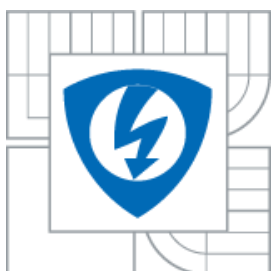




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELEKTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

DIAGNOSTIKA VLASTNOSTNÍ ELEKTROIZOLAČNÍCH HMOT

PROPERTIES DIAGNOSTICS OF ELECTRICALLY INSULATING POTTING COMPOUNDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Bc. Jan Mucha

Ing. Martin Frk, Ph.D

BRNO 2014

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá současným vývojem stavu elektroizolačních hmot používaných v elektrotechnickém průmyslu, včetně kladených požadavků na jejich elektrické a mechanické vlastnosti. Součástí práce je příprava několika sad vzorků epoxidových pryskyřic a pomocí aplikace vhodných diagnostických metod charakterizování jejich vlastností v širokém teplotním rozsahu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektroizolační hmoty, epoxidová pryskyřice, elektrické a mechanické vlastnosti, diagnostické metody a měření.

ABSTRACT

Submitted paper deals with the current condition of electrical insulating substances used in electrical engineering, including the requirements on their electric and mechanical qualities. Another part of this paper constitutes a set of samples of epoxy resins and through and application of appropriate diagnostical methods the characterization of their attributes in the wide temperature range.

KEYWORDS

Electric insulating materials, epoxy resin, electrical and mechanical characteristics, diagnostic techniques and measurement

MUCHA, J. *Diagnostika vlastností elektroizolačních zalévacích hmot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2014. 70 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Diagnostika vlastností elektroizolačních zalévacích hmot jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujícího zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům společnosti ABB s. r. o., zejména panu Ing. Pavlu Váňovi a panu Ing. Davidu Raschkovi, Ph.D za jejich cenné rady a pomoc při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Teoretická část	2
1.1 Polymery	2
1.2 Epoxidové pryskyřice	4
1.2.1 Vytvrzování epoxidových pryskyřic	5
1.2.2 Výrobní proces epoxidových pryskyřic	7
1.2.3 Epoxidové pryskyřice v průmyslových aplikacích	8
1.2.4 Epoxidové pryskyřice v elektrotechnickém průmyslu	9
1.2.5 Vliv působení teploty na vlastnosti epoxidových pryskyřic	10
1.2.6 Vliv absorbované vody na vnitřní rezistivitu epoxidových izolantů ..	10
1.3 Teplota skelného přechodu (T _g)	10
1.3.1 Dielektrická termální analýza (DETA)	12
1.4 Reakční kinetika epoxidových pryskyřic	13
1.5 Epoxidová pryskyřice v kompozitních materiálech	14
1.5.1 Kompozitní materiály a jejich vliv na dielektrické vlastnosti	14
1.6 Elektroizolační zalévací hmoty	15
1.6.1 Technologie výroby elektroizolačních zalévacích hmot	15
1.7 Degradční procesy v elektroizolačních hmotách	19
1.7.1 Částečné výboje	19
1.7.2 Degradace epoxidové pryskyřice částečnými výboji	19
1.7.3 Elektrické stromečky	20
1.7.4 Vliv klimatických činitelů	21
1.8 Složení zalévacích hmot	22
1.8.1 Příprava vzorků zalévacích hmot	23
1.9 Technologie procesu zalévání	24
1.9.1 Numerické simulace licího procesu	24
1.10 Vlastnosti elektroizolačních zalévacích hmot	25

1.11	Mechanické zkoušky elektroizolačních zalévacích hmot.....	28
1.11.1	Zkouška tahem.....	29
1.11.2	Zkouška ohybem.....	32
1.11.3	Zkouška tlakem.....	34
1.12	Dielektrikum a izolant	35
1.12.1	Anorganické tuhé izolanty	36
1.12.2	Organické tuhé izolanty	37
1.12.3	Kapalné izolanty	37
1.12.4	Plynné izolanty	38
1.13	Veličiny a vlastnosti dielektrika	38
1.13.1	Dielektrická absorpce	42
1.13.2	Stárnutí elektroizolačních materiálů	43
1.14	Měřicí metody.....	44
1.14.1	Měření elektrického odporu.....	44
1.14.2	Měření elektrické pevnosti.....	45
2	Experimentální část	46
2.1	Popis pracoviště a použitých přístrojů	46
2.1.1	Měřicí systémy.....	46
2.1.2	Sterilizační komora	48
2.1.3	Zkušební stroj pro měření mechanických vlastností.....	48
2.1.4	Software pro měření mechanických vlastností	49
2.2	Vzorky pro měření elektrických vlastností.....	49
2.3	Vzorky pro měření mechanických vlastností.....	50
2.4	Vyhodnocení naměřených hodnot	50
2.4.1	Porovnání nabíjecího a vybíjecího proudu	50
2.4.2	Výpočet polarizačních indexů	51
2.4.3	Výpočet rezistivity	52
2.4.4	Výpočet relativní permitivity.....	55
2.4.5	Výpočet elektrické pevnosti.....	57
2.4.6	Teplotně stabilizované vzorky	59
2.5	Zkoušky mechanických vlastností.....	61
2.5.1	Zkouška tahem.....	61
2.5.2	Zkouška tlakem.....	62

2.5.3	Ohybová zkouška.....	63
3	Závěr	64
	Literatura	66
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	68
	PŘÍLOHY	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Základní rozdělení polymerů.....	2
Obr. 2 Schéma reakce polymerace, převzato z [1]	3
Obr. 3 Schéma reakce polyadice, převzato z [1]	4
Obr. 4 Schéma reakce polykondenzace, převzato z [1]	4
Obr. 5 Glycidyllová skupina (2,3- epoxypropylová skupina).....	5
Obr. 6 Epoxidová skupina	5
Obr. 7 Diagram TTT, převzato z [7].....	7
Obr. 8 Trhlina v elektroizolační hmotě.....	18
Obr. 9 Izolační průraz v elektroizolační hmotě	18
Obr. 10 Fáze růstu elektrických stroměčků	21
Obr. 11 Příprava licí hmoty, převzato z [13]	23
Obr. 12 Tunelová dotvrzovací pec, převzato z [26]	24
Obr. 13 Zkušební těleso pro tahové zkoušky.....	30
Obr. 14 Schéma univerzálního zkušebního stroje, převzato z [1]	30
Obr. 15 Zkouška Ohybem, převzato z [1]	33
Obr. 16 Zkušební těleso pro ohybovou zkoušku	33
Obr. 17 Atomová polarizace	35
Obr. 18 Orientační polarizace	36
Obr. 19 Schéma rozdělení elektroizolačních materiálů	36
Obr. 20 Grafické znázornění komplexní permitivity	39
Obr. 21 Časový průběh náboje při nabíjení kondenzátoru, převzato z [29]	42
Obr. 22 Časový průběh náboje při vybíjení kondenzátoru, převzato z [29]	42
Obr. 23 Voltampérova metoda měření izolantů.....	44
Obr. 24 Měřicí přístroj 4339B	46
Obr. 25 Měřicí přístroj s elektrodoým systémem	47
Obr. 26 Schéma tříelektrodového systému	47
Obr. 27 Agilent E4980A Precision LCR Meter.....	47
Obr. 28 Sterilizační komora.....	48
Obr. 29 Zkušební stroj pro mechanické zkoušky	49
Obr. 30 Naměřené nabíjecí a vybíjecí proudy	51

Obr. 31 Závislost vnitřního odporu na čase	51
Obr. 32 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO hmota, 23 °C	54
Obr. 33 Závislost vnitřní rezistivity na teplotě, CY238-1, 23 °C	54
Obr. 34 Frekvenční závislost relativní permitivity, SYNPO hmota, vzorky 1 až 10	56
Obr. 35 Frekvenční závislost ztrátového čísla, SYNPO hmota, vzorky 1 až 10	57
Obr. 36 Frekvenční závislost ztrátového činitele, SYNPO hmota, vzorky 1 až 10.....	57
Obr. 37 Měřicí přístroj na průrazné napětí	59
Obr. 38 Závislost vnitřní rezistivity na čase, vzorky v původním stavu, CY 238-1.....	60
Obr. 39 Závislost vnitřní rezistivity na čase, teplotně stabilizované vzorky, CY 238-1 .	61
Obr. 40 Závislost vnitřní rezistivity na čase, CY 238-1, 23 °C	79
Obr. 41 Závislost vnitřní rezistivity na čase, CY 238-1, -35 °C.....	79
Obr. 42 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO, -35 °C.....	80
Obr. 43 Závislost vnitřní rezistivity na čase, vzorky v původním stavu, CY238-1.....	80
Obr. 44 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO hmota - vzorky v původním stavu	81
Obr. 45 Závislost vnitřní rezistivity na čase, CY 238-1- teplotně stabilizované vzorky	81
Obr. 46 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO hmota - teplotně stabilizované vzorky	82
Obr. 47 Závislost vnitřní rezistivity na teplotě, SYNPO hmota	82

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Technologie výroby epoxidových pryskyřic, převzato z [19]	16
Tab. 2 Hodnoty polarizačních indexů, SYNPO hmota při 23 ± 2 °C	52
Tab. 3 Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků	53
Tab. 4 Vypočítané koeficienty mocninné funkce proudu	55
Tab. 5 SYNPO – průrazné napětí	58
Tab. 6 CY 238-1 – průrazné napětí	58
Tab. 7 Vzorky v původním stavu hmoty CY 238-1	59
Tab. 8 Teplotě stabilizované vzorky hmoty CY 238-1	60
Tab. 9 Naměřené a vypočítané hodnoty při zkoušce v tahu	62
Tab. 10 Naměřené hodnoty při zkoušce v tlaku	62
Tab. 11 Naměřené hodnoty při zkoušce v ohybu	63
Tab. 12 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 hmota při teplotě 23 ± 2 °C	71
Tab. 13 Vypočítané hodnoty, SYNPO při teplotě 90 °C	71
Tab. 14 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 hmota při teplotě 90 °C	71
Tab. 15 Vypočítané hodnoty, SYNPO hmota při teplotě -35 °C	72
Tab. 16 Vypočítané hodnoty, CY238-1 hmota při teplotě -35 °C	72
Tab. 17 Vypočítané hodnoty, SYNPO hmota – vzorky v původním stavu	73
Tab. 18 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 – vzorky v původním stavu	73
Tab. 19 Vypočítané hodnoty, SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky	73
Tab. 20 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 hmota, teplotně stabilizované vzorky	73
Tab. 21 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota při teplotě 23 ± 2 °C	74
Tab. 22 Polarizační indexy, SYNPO hmota při teplotě 90 °C	74
Tab. 23 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota při teplotě 90 °C	74
Tab. 24 Polarizační indexy, SYNPO hmota při teplotě -35 °C	74
Tab. 25 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota při teplotě - 35 °C	75
Tab. 26 Polarizační indexy, SYNPO hmota – vzorky v původním stavu	75
Tab. 27 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota – vzorky v původním stavu	75
Tab. 28 Polarizační indexy, SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky	76
Tab. 29 Polarizační indexy, CY238-1 hmota – teplotně stabilizované vzorky	76
Tab. 30 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota při teplotě 23 ± 2 °C	77

Tab. 31 Vypočítané koeficienty, CY238-1 hmota při teplotě -35 °C	77
Tab. 32 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota při teplotě -35 °C	77
Tab. 33 Vypočítané koeficienty, CY238-1 hmota – vzorky v původním stavu	77
Tab. 34 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota – vzorky v původním stavu	77
Tab. 35 Vypočítané koeficienty, CY238-1 hmota – teplotně stabilizované vzorky	78
Tab. 36 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky	78

ÚVOD

V současné době, zvláště v oblasti průmyslu se celá řada materiálů nahrazuje pouze jedním druhem materiálu. Je tomu tak z důvodu jeho lepších vlastností, které se dají podle dané aplikace upravit téměř na míru. Mezi nejpoužívanější a velmi rychle se rozvíjející materiály patří zejména polymery a kompozitní materiály na jejich bázi. Uplatní se v řadě průmyslových odvětví. Pro mou práci je to odvětví elektrotechnologie. V elektrotechnologii mají kompozitní polymery velké zastoupení, ať už při výrobě desek plošných spojů, tak zvláště jako izolanty používané při vysokonapěťových aplikacích. Z vysokonapěťových aplikací můžu zmínit zejména výrobu transformátorů a senzorů vysokého napětí. V této oblasti se elektroizolační zalévací hmoty hojně používají.

V elektrotechnickém průmyslu se používají zalévací hmoty zvláště na bázi epoxidových pryskyřic. Epoxidové pryskyřice patří v elektrotechnice mezi často používané materiály, zvláště proto, že mají dobré elektrické, mechanické i tepelné vlastnosti. Také mají dobré uplatnění v samotné výrobě, protože se jednoduše tvarují. Často se jejich vlastnosti upravují přidáním různých druhů aditiv a tím vznikne kompozitní materiál.

Tyto kompozity ve finále vytvoří elektroizolační zalévací hmoty, které jsou předmětem mé práce. Z hlediska jejich použitelnosti se klade důraz na jejich důkladné prostudování a zjištění jejich vlastností. Zajímá nás tedy, jak se jejich vlastnosti a chování mění v provozu při nejrůznějších podmínkách.

Hlavním cílem práce je seznámit s problematikou elektroizolačních zalévacích hmot na bázi epoxidových pryskyřic a připravit vzorky ve spolupráci se společností ABB, na kterých bude provedeno měření a vyhodnocení jejich elektrických a mechanických vlastností v širokém teplotním rozsahu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Polymery

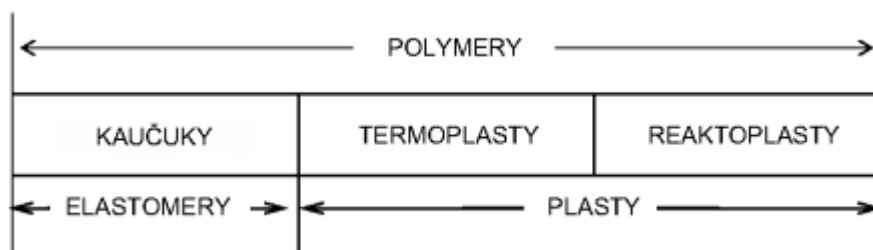
V dnešní době, zvláště v odvětví průmyslu elektrotechnologie se kladou stále větší požadavky na množství a vlastnosti konstrukčních a pomocných materiálů. Postupně dochází k úbytku použití kovových materiálů, které jsou nahrazeny materiály nekovovými. Z nekovových materiálů jsou nejdůležitější polymery (plasty). Dále je možné použít z nekovových materiálů dřevo, pryž, keramiku, porcelán, kůži, textílii a jiné.[1]

Polymery (plasty) jsou makromolekulární sloučeniny, to znamená, že se skládají z obřích molekul (makromolekul), které jsou vytvářeny množstvím malých základních konstitučních jednotek (merů) jednoho nebo více druhů. Dosud zatím není přesně stanovena hranice mezi vysoko (makro) a nízkomolekulární látkou. Charakteristika makromolekulárních látek spočívá v tom, že se v jejich vzorci jednotlivé atomy či skupiny atomů pravidelně opakují a taky, že při odstranění nebo přidání konstitučních jednotek do molekulárního řetězce se vlastnosti látky nijak výrazně nemění.[2]

Základním prvkem je uhlík, který má schopnost vytvářet dlouhé řetězce a v kombinaci s jinými prvky je podstatou vzniku sloučenin makromolekulárního typu. Je tedy v makromolekulách látky vždy obsažen.

Další prvek, který má podobnou vlastnost je křemík. Křemík má makromolekulární sloučeniny mnohem méně početné, než uhlík, ale jsou neméně důležité. Atomy křemíku jsou v makromolekulárních sloučeninách vázány prostřednictvím atomů kyslíku.[2]

Podle chemické povahy struktury makromolekul a podle jejich napěťově deformačního chování se dělí polymery na termoplasty, reaktoplasty a elastomery. Rozdělení polymerů je zobrazeno na Obr. 1.[3]



Obr. 1 Základní rozdělení polymerů

Termoplasty

Představují takové polymerní materiály, které za zvýšených teplot měknou a přecházejí do plastického stavu a za těchto podmínek je lze zpracovávat. Do skupiny termoplastů patří například polyetylen, polyvinylchlorid, polystyren, polypropylen, polyamidy, polymethylmethakrylát a další.[4]

Reaktoplasty

Reaktoplasty (termosety) nepřecházejí do elastického nebo plastického stavu. Není je možno převést do taveniny. Vznikají z výchozích sloučenin, obvykle z materiálů sestávajících ze sloučenin s velkou, nikoli však s obří molekulou působením chemických reakcí vyvolaných zvýšením teploty nebo katalyzátorem (vytvrzováním). Hustě a nevratně zesílují, tím se stanou nerozpustné a netavitelné. To má za následek velkou pevnost, ale současně i jistou křehkost.[2]

Mezi reaktoplasty můžeme zařadit například epoxidové pryskyřice, polyesterové pryskyřice, fenolformaldehydové pryskyřice a další. Nejpoužívanější pryskyřicí v oblasti elektrotechnického průmyslu jsou epoxidy, které jsou pevné, odolné proti vyšším teplotám a povětrnostním vlivům. Čistá pryskyřice se používá na izolační zalévání vodičů a obvodů v elektrotechnice, na slévárenské modely, lisovací nástroje, jako lepidla a další.[1]

Elastomery

Elastomery jsou pryže, tedy polymery s extrémně velkými hodnotami pružné deformace. Jsou amorfni nebo slabě krystalické. Makromolekuly jsou tvořeny atomy uhlíku, křemíku a kyslíku. Zástupci elastomerů jsou kaučuky, například izoprenový nebo styrenbutadienový kaučuk.[3]

Plasty se vyrábějí modifikací přírodních makromolekulárních látek, na které se chemicky vážou některé nízkomolekulární sloučeniny, které obsahují malé molekuly. Pro výrobu plastů jsou základem nízkomolekulární látky, tzv. monomery, které jsou výchozími látkami pro výrobu makromolekulárních látek, tzv. polymerů. Tento děj se nazývá polyreakce. Je to slučování monomerů na polymery.

Takovéto reakce jsou schopny pouze sloučeniny, které mají v molekule alespoň dvě místa schopná chemicky reagovat s dalšími molekulami. Reakce schopným místem může být třeba alkoholická skupina -OH, karboxylová skupina -COOH, dvojné vazby C=C, C=N apod. Existují tři druhy polyreakcí, a to:

Polymerace

Polymer vzniká prostým spojováním základních monomerních jednotek a má tedy chemickou stavbu shodnou s monomerem. Výchozí monomer musí mít dvojnou vazbu C=C. Při chemické reakci mezi molekulami monomeru se tato dvojná vazba rozštěpí a postupně se navazují další monomerní jednotky a polymerní řetězec se prodlužuje. Polymerace je nastartována vysokým tlakem, teplotou nebo přidávkem katalyzátoru. Schéma reakce polymerace je na Obr. 2.[4]



Obr. 2 Schéma reakce polymerace, převzato z [1]

Polyadice

Monomery, které vstupují do polyreakce, jsou různého typu a výsledný polymer má chemickou stavbu od nich odlišnou. Při této reakci se neuvolňují žádné vedlejší

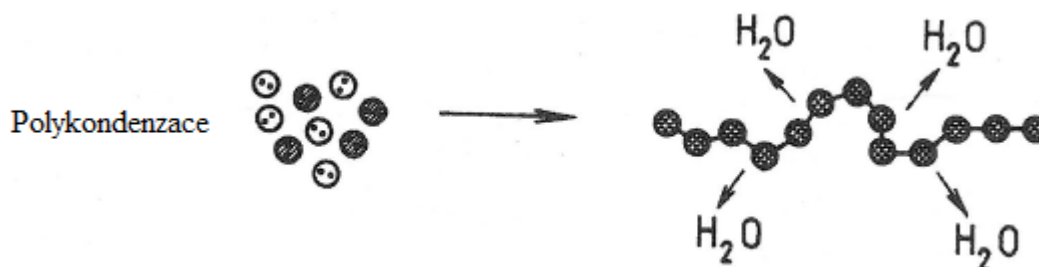
produkty. Polyadice je zobrazena na Obr. 3.



Obr. 3 Schéma reakce polyadice, převzato z [1]

Polykondenzace

Monomery jsou různého typu a při jejich slučování se odštěpují (kondenzují) nízkomolekulární reakcí zplodiny, např. alkohol, čpavek a voda. Je to reakce dvou typů nízkomolekulárních látek, které mají minimálně dvě funkční skupiny ($-OH$, $-COOH$, $-NH_2$). Reakcí mezi funkčními skupinami postupně narůstá polymerní řetězec. Složení polymeru je odlišné od složení výchozí směsi monomerů. Schéma reakce polykondenzace je na Obr. 4.[4]



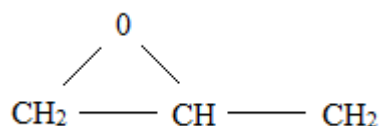
Obr. 4 Schéma reakce polykondenzace, převzato z [1]

1.2 Epoxidové pryskyřice

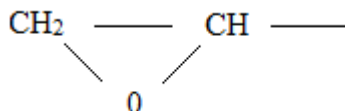
Pod označením epoxidové pryskyřice rozumíme sloučeniny, které obsahují v molekule více než jednu epoxidovou (oxiranovou) skupinu. Jedná se o reaktoplast a patří do skupiny organických makromolekulárních látek.[5]

Epoxidové pryskyřice se nejčastěji vyrábějí reakcí Epichlorhydrinu s Bisfenolem A. Vytvrzování může probíhat za normálních teplot a jako tvrdidla se používají např. polyaminy. Polyaminy jsou organické sloučeniny obsahující více než jednu aminoskupinu. Jsou to materiály s dobrými mechanickými a elektroizolačními vlastnostmi, proto mají v elektrotechnologii široké zastoupení. Disponují dobrou tepelnou a chemickou odolností, vyznačují se také výbornou přilnavostí ke kovům, sklu, dřevu i keramice. Dále patří mezi látky hydrofobní, nehořlavé, dobře opracovatelné a látky s dlouhou životností.

Epoxidové pryskyřice můžeme rozdělit na dvě skupiny. První skupinou jsou typy, které mají glycidyllové skupiny, jsou připravovány reakcí Epichlorhydrinu s vhodnými surovinami. Druhou skupinou jsou typy, které mají epoxidové skupiny, připravované jsou epoxidací nenasycených sloučenin. Obě skupiny jsou pro přehlednost uvedeny na obrázcích níže.



Obr. 5 Glycidyllová skupina (2,3- epoxypropylová skupina)



Obr. 6 Epoxidová skupina

Mezi nejčastější typy epoxidových pryskyřic patří produkty alkalické kondenzace Epichlorhydrinu s Bisfenolem A, označovány také jako tzv. „dian“. [5]

1.2.1 Vytvrzování epoxidových pryskyřic

Vytvrzování epoxidových pryskyřic je proces, ve kterém se pomocí chemických reakcí převádějí nízkomolekulární, rozpustné a tavitelné epoxidové monomery na netavitelné a nerozpustné polymery, které mají převážně trojrozměrnou strukturu. Epoxidové pryskyřice po vytvrzení získávají nové vlastnosti, jako je elasticita, mechanická pevnost, tepelná odolnost a další. Tyto vlastnosti jsou velmi důležité pro většinu průmyslových aplikací.[5]

Epoxidové pryskyřice jsou bezbarvé až nažloutlé hmoty konzistence kapalin až tvrdých, křehkých látek. Za běžných podmínek jsou prakticky neomezeně skladovatelné. Nízkomolekulární typy jsou rozpustné v aromatických uhlovodících, vysokomolekulární hlavně v ketonech a esterech.[6]

Vytvrzování epoxidových pryskyřic lze uskutečnit polyadici sloučenin s aktivním vodíkovým atomem na epoxidové skupiny, polykondenzací přítomných hydroxylových skupin a polymerací epoxidových skupin. Největší význam v praxi má vytvrzování polyadici sloučenin s aktivním vodíkovým atomem na epoxidové skupině. Jako tvrdidla se nejčastěji používají polyaminy, polythioly, anhydridy polykarboxylových kyselin a pryskyřice obsahující reaktivní methylolové skupiny jako jsou fenol-, močovino- a melaminoformaldehydové pryskyřice.

Vytvrzování polyaminy

Jde o vytvrzování nejčastěji cykloalifatickými polyaminy a vícefunkčními thioly a thiokyselinami vytvrzují epoxidové pryskyřice za běžné teploty. Z hlavní části proběhne vytvrzení během několika hodin, úplné vytvrzení pak během několika dnů.

Vytvrzování anhydridy polykarboxylových kyselin

Používají se pro zalévací, impregnační a laminační pryskyřice v elektrotechnice aj jako nátěrové hmoty. Vytvrzování probíhá za teplot 100 °C až 200 °C několik hodin, podobně jako v případě fenolických a aminických pryskyřic.

Epoxidové pryskyřice odolávají velmi dobře zásadám i zředěným roztokům

anorganických i organických kyselin. Jejich chemická odolnost stoupá s molekulovou hmotností a stupněm zesíťování. Velký vliv má i druh tvrdidla. Pryskyřice vytvrzované anhydridy dikarboxylových kyselin například obsahují menší koncentraci hydroxylových skupin, a proto jsou méně navlhavé. Tvrdidla s aromatickým jádrem propůjčují pryskyřicím zase větší teplotní odolnost než tvrdidla alifatická.[6]

Po vytvrzení se mění epoxidová pryskyřice na pevnou hmotu, takové změně stavu se říká „želatinace“. Stav vytvrzování, při kterém vzniká první molekula s nekonečně vysokou molekulární hmotností, je bod gelace. Při dosažení takového bodu již není pryskyřice rozpustná v rozpouštědlech. Není tedy dál ve svém stavu zpracovatelná jako tekutá.

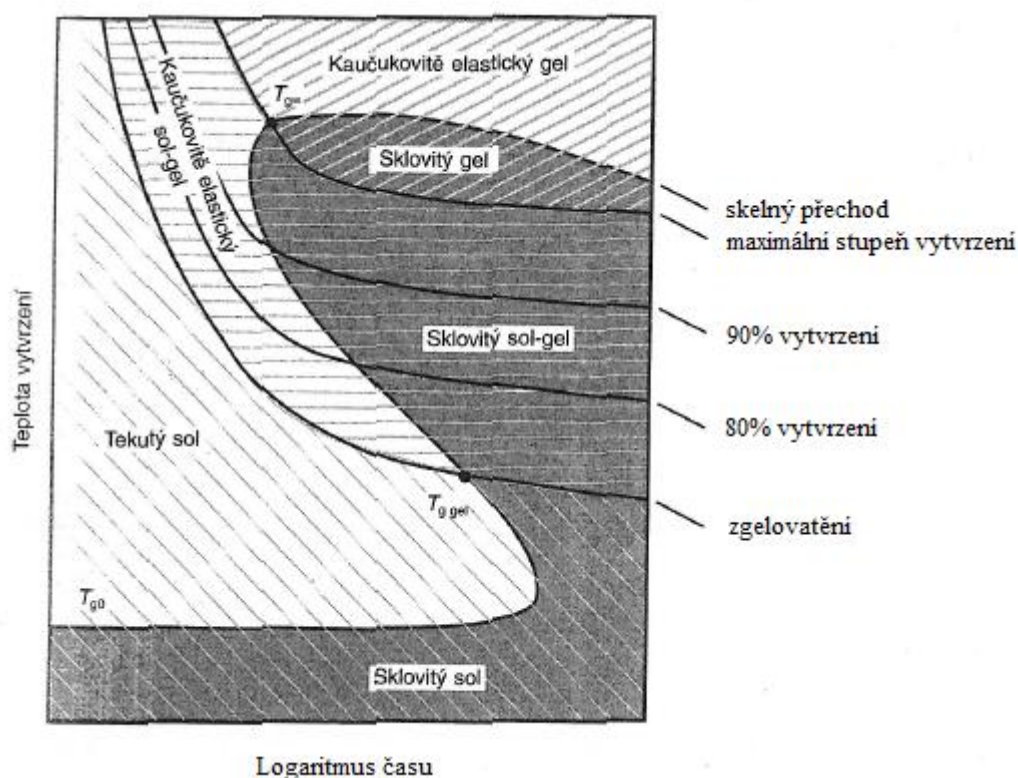
Schematický přehled o základním chování pryskyřic při vytvrzování udává rovnovážný diagram času na teplotě, tzv. TTT diagram (Time-Temperature-Transition). Diagram znázorňuje, v jakém stupni vytvrzení se nachází reakční směs v určitém čase a teplotě. Diagram je znázorněn na Obr. 7.

Teploty počátku skelného přechodu nezesíťované pryskyřice (T_{go}), skelného přechodu gelující pryskyřice (T_{ggel}) a zcela vytvrzené pryskyřice ($T_{g\infty}$) jsou charakteristické teploty celého epoxidového systému v určitých fázích. Teplota skleného přechodu se mění v závislosti na tom, jak dalece je systém vytvrzen a jak silně je zesíťováním omezen pohyb molekul.

I nezesíťovaný systém má teplotu T_g , která velmi často leží nízko, pod teplotou okolí. Pod touto teplotou, která se označuje T_{g0} , není možné provést vytvrzení, protože došlo k omezení pochodů jednotlivých, reakce schopných složek. Pryskyřice zůstává ve sklovitém výchozím tvaru.

Označení *sol* představuje roztok látky s částečně vytvrzeným podílem. Takováto látka je rozpustná v rozpouštědlech a nepřešla ještě do stavu gelu, který se vyznačuje zesíťováním. Nad teplotu T_{g0} je pryskyřice kapalná. Zvolíme-li příliš nízkou teplotu pod (T_{ggel}), vytvrdí se systém jen minimálně a po překročení křivky zesklenní systém na delší dobu zamrzne, aniž by předtím mohl zgelovatět.

Do oblasti úplného vytvrzení vstoupí pryskyřice teprve při vyšší teplotě. Po určité době zpracování překročí křivku „maximálního stupně vytvrzení“ a vstoupí do fáze sklovitého gelu, ve kterém se již nevyskytují ani rozpustné ani reaktivní výchozí složky.



Obr. 7 Diagram TTT, převzato z [7]

Sol je látka zcela rozpustná v rozpouštědlech, je málo vytvrzená. *Sol-gel* je směs rozpustných a nerozpustných podílů. *Gel* je zcela nerozpustná látka, která je zcela vytvrzená.[7]

1.2.2 Výrobní proces epoxidových pryskyřic

Epoxidové pryskyřice můžeme získat v kapalném nebo pevném stavu. Případně můžeme vytvořit modifikovanou epoxidovou pryskyřici. Jednotlivé druhy epoxidové pryskyřice jsou popsány níže:[8]

Epoxidová pryskyřice v kapalném stavu

Epoxidová pryskyřice v kapalném stavu vzniká následujícím procesem. V tomto procesu se Epichlorhydrin a Bisfenol A umístí do reaktoru v poměru 10:1. Dvacetiprocentní až čtyřicetiprocentní roztok hydroxidu sodného se pomalu přidá do reakční nádoby v okamžiku, kdy se roztok uvede do varu. Roztok se uchovává v páře, do které byly přidány 2 moly hydroxidu sodného na 1 mol Bisfenolu A. Roztok se rozdělí nadále do dvou vrstev. Nezareagovaný Epichlorhydrin se odstraní vakuovou destilací. Rozpouštědlo se pak přidá k pryskyřici a reakce je dokončena s přebytkem roztoku hydroxidu sodného. Pryskyřice se rozdělí na solné roztoky, které se důkladně umyjí vodou, aby se získala čistá (čirá) pryskyřice. Rozpouštědlo se odstraní vakuovou destilací.

Epoxidová pryskyřice v tuhém stavu

K získání pryskyřice v tuhém stavu je zapotřebí přidat Epichlorhydrin a Bisfenol A do

reaktoru v molárním poměru s malým přebytkem Epichlorhydrinu. Do celého procesu se přimíchá vodní louh sodný a důkladně se promíchá. Po jedné hodině je reakce dokončena a získá se hmota. Separace fází je způsobena přidáním rozpouštědla. Solný roztok se odebere a roztok pryskyřice se promyje vodou, aby se odstranily stopy solí. Pryskyřice v tuhém stavu se získá odstraněním rozpouštědla vakuovou destilací.

Modifikovaná epoxidová pryskyřice

Modifikované epoxidové pryskyřice jsou pryskyřice tvořeny adičními sloučeninami s vinyl, akryl, polyesterovými pryskyřicemi, fenolovými novolaky a další.[8]

1.2.3 Epoxidové pryskyřice v průmyslových aplikacích

Epoxidové pryskyřice můžeme použít v různých odvětvích průmyslu, ať už jako pěny, lepidla, konstrukční materiály, zalévací hmoty, epoxidové prášky, kompozity, lamináty a další. Jednotlivé použití epoxidové pryskyřice je popsáno níže:[8]

Epoxidové pěny

Epoxidové pryskyřice se dají použít k vytvoření pevné, lehké, pěnivé struktury s dobrými izolačními vlastnostmi. Jsou zvláště používány jako pěny v procesu “zalévání”, tak i v samotném procesu zalévání elektroizolačních zařízení. Jsou vyráběny buď chemickou reakcí, případně jsou začleněny do plniv v kapalném stavu.

Lepidla

Všestranné vlastnosti epoxidových pryskyřic zvyšují jejich hodnotu, jakožto lepidel v civilních a vojenských aplikacích. Asi pět procent v celkové produkci epoxidové pryskyřice je spotřebováno na různé druhy lepidel, používaných v mnoha průmyslových odvětvích. Lepidla na bázi epoxidových pryskyřic velmi dobře přilnou k většině druhů povrchů, s výjimkou některých nepolárních substrátů. Většinou se jedná o specializovanou technologii výroby lepidel pro konkrétní aplikaci v průmyslu.

Konstrukční materiály

Epoxidové pryskyřice jsou také v současné době používány jako pojiva v materiálech pro stavebnictví. Většinou se jedná o dvousložkový systém, který obsahuje tekutou epoxidovou pryskyřici, ředidla, plniva, zahušťovadla a vytvrzovací činidla. Jsou používány pro výrobu betonu, průmyslových podlah a dále třeba k vyplňování trhlin v betonových konstrukcích.

Epoxidové prášky

Nejčastěji používané prášky jsou založeny na tzv. B-fázi pryskyřic s aromatickými aminy.

Kompozity

Kompozity jsou materiály založené na složení z více druhů materiálů. Jsou doplněny o různé druhy vláken. V současné době vlákna, které se pohybují v pokročilých materiálech, jsou vlákna uhlíková, grafitová, skleněná, hliníková, borová a lze také použít aromatické polyamidy. Takováto vlákna mají dobré vlastnosti s nízkou hustotou a mají také obrovskou pevnost. Je to řádově asi 80 až 550 GPa.

Lamináty

Laminátové epoxidové izolace jsou převážně používány jako lišty, tyčinky a trubičky. Epoxidové lamináty mají také uplatnění v oblasti námořní a lodní. Epoxidové pryskyřice jsou nahrazeny polyestery ve speciálních aplikacích, kde se klade důraz na pevnost pod vodou.

Trubice

Epoxidové pryskyřice se dají použít také jako sklem vyztužené trubice a roury.

Epoxidové povlaky

Průmyslové povlaky jsou největším spotřebitelem epoxidových pryskyřic. Tyto pryskyřice se používají jako chemické a účelové nátěry. Epoxidové pryskyřice poskytnou tenkou vrstvu nátěru, která má dobrou mechanickou pevnost a dobře přilne k různým podkladům. Jsou odolné vůči chemikáliím, korozi. Epoxidové nátěry jsou k dispozici jako tekuté pryskyřice, pryskyřice v pevném stavu, dále jako termoplastické pryskyřice o vysoké molekulové hmotnosti, multifunkční pryskyřice a další pryskyřice pro zvláštní účely.

Další aplikace

Epoxidové pryskyřice mohou zlepšit odolnost vláken v kompozitních materiálech, zvláště jejich lámavost a odolnost proti rozmačkání. Jsou také dále používány jako meziprodukty do stabilizátorů a změkčovadel.[8]

1.2.4 Epoxidové pryskyřice v elektrotechnickém průmyslu

Dále uvádím dva typy epoxidové pryskyřice, které se přímo používají v elektrotechnickém průmyslu. Epoxidové pryskyřice se používají v elektrotechnickém průmyslu pro své charakteristické vlastnosti, mezi které patří zejména dobré chemické a elektroizolační vlastnosti v poměrně široké oblasti teplot. Jsou velmi odolné vůči vodě, roztokům alkáliím a kyselin a jsou také odolné vůči některým rozpouštědlům. Jedná se o pryskyřice s názvem Rhenatech a Votastat. Jejich charakteristiku si probereme níže:[9]

Rhenatech

Představuje bezrozpouštědlovou epoxidovou pryskyřici. Je základní izolační zalévací pryskyřicí bílo-šedé barvy, která je vhodná pro četné aplikace v elektrotechnice. Používá se na malé transformátory, cívky, svorkovnice a senzory. Významnou roli hrají snadná manipulace a velmi dobrá skladovatelnost. Tvrzená pryskyřice má velmi dobré elektrické a mechanické vlastnosti, ale i vysokou povrchovou kvalitu. Rhenatech je skvěle přilnavý s kovy, plasty, má malé celkové smrštění a vysokou pevnost.

Votastat

Je druh epoxidové pryskyřice, kterou aplikujeme pomocí VPI (vakuově tlakové impregnace). Má velmi dobrou skladovatelnost, mechanické a elektrické vlastnosti. Vytvrzuje se v rozmezí 160 – 200 °C. Používá se pro izolační systémy elektrických točivých strojů a trakčních motorů.[9]

1.2.5 Vliv působení teploty na vlastnosti epoxidových pryskyřic

V epoxidových pryskyřicích dochází také k elektrickým degradačním procesům, jako jsou například elektrické stromečky, které jsou popsány v kapitole níže. Bylo zjištěno experimentálním měřením, že tento druh degradace je závislý na teplotě. Z tohoto důvodu je tedy důležité studovat vliv teploty na dielektrické vlastnosti polymerů a vztah teplotní závislosti těchto vlastností na možné mechanismy elektrické degradace.[10]

Dielektrické vlastnosti epoxidových pryskyřic můžeme charakterizovat pomocí tzv. dielektrické spektroskopie. Dielektrická spektroskopie slouží ke sledování molekulární dynamiky studovaných dielektrických materiálů s cílem interpretovat výsledky experimentu na molekulární úrovni. Základní vyšetřování dielektrické spektroskopie je přinést informace o různých molekulárních pohybech a relaxačních procesech. Unikátní vlastnost dielektrické spektroskopie je široký frekvenční rozsah, od 10^{-5} Hz do 10^{11} Hz, přes který polymery reagují na přiložené elektrické pole. Tento velký frekvenční rozsah je klíčovým prvkem, který umožňuje člověku sledovat pozorované dielektrické odezvy pomalých a rychlých molekulárních pochodů.[11]

Velký zájem ze strany průmyslu o dielektrické a elektrické vlastnosti polymerů odráží rostoucí použití těchto materiálů v elektronických propojovacích zařízeních, optoelektronických spínačích, v deskách plošných spojů, v mikrovlnných sestavách pro radary, v oblasti výroby baterií a dále třeba v oblasti výzkumu palivových článků.[11]

1.2.6 Vliv absorbované vody na vnitřní rezistivitu epoxidových izolantů

Nasákavost epoxidových izolantů se stanoví měřením změny hmotnosti při různé relativní vlhkosti vzduchu. Bylo provedeno měření s vzorky epoxidových pryskyřic, které dosáhly absorpční rovnováhy v průběhu skladování při různé relativní vlhkosti. Významný pokles vnitřní rezistivity je pozorován s rostoucím obsahem vody. Absorpci vody do epoxidových pryskyřic popisuje Fickův difúzní zákon. Model založený na Fickově difúzi byl vyvinut tak, aby simuloval dynamickou degradaci vnitřní rezistivity během skladování při vlhkosti. Výsledky simulace jsou ověřeny opětovným měřením vnitřní rezistivity vzorků epoxidové pryskyřice během 99% relativní vlhkosti při uskladnění.

V konečném důsledku tohoto experimentu bylo zjištěno, že vnitřní rezistivita vzorků epoxidové pryskyřice se snižuje v průběhu měření asi o 7 řádů s rostoucím obsahem vody. Na základě těchto výsledků, vyvinutý model umožňuje výpočet časově závislé rezistivity během skladování při kontrolované vlhkosti.[12]

1.3 Teplota skelného přechodu (T_g)

V oblasti epoxidových pryskyřic a jejich aplikací je neméně důležitá Teplota skelného přechodu (T_g). Skelný přechod je velmi významný teplotní bod pro polymerní materiály. Při této teplotě dochází k zásadním změnám ve struktuře polymeru na molekulární úrovni a ke změnám fyzikálních vlastností. Každý polymer je charakteristický vlastní teplotou skelného přechodu. Při dosažení této teploty dochází v polymeru k zesíťování vazeb polymerního řetězce.

Teplota skelného přechodu je důležitá, protože lze podle ní efektivně kontrolovat stupně zesíťování polymerního materiálu. Je to dobrý prvotní indikátor tepelné odolnosti polymerního materiálu během výrobního procesu a během „pracovního života“ finálního výrobku. Lze také podle T_g sledovat správné složení polymeru.[13]

Při nižší teplotě je polymer tvrdý, křehký, neohebný (molekuly jsou nepohyblivé). Při vyšších teplotách polymer připomíná kaučuk a stává se měkkým, pružným a ohebným. Výsledná hodnota T_g závisí na mobilitě polymerního řetězce, protože platí, že čím méně pohyblivý řetězec, tím vyšší hodnota T_g . Teplota skelného přechodu se dá ovlivňovat několika způsoby, k jejímu zvýšení vedou zejména faktory, jako je tuhost řetězce, mezimolekulární síly a stupeň zesíťování.

Tužší polymerní řetězec má za následek snížení pružnosti řetězce, snížení pohyblivosti řetězce a zvýšení T_g . Silnější mezimolekulární síly vedou k omezení pohybu řetězce a ke zvýšení T_g . Stupeň zesíťování hraje důležitou roli, protože přítomnost vazeb mezi jednotlivými řetězci způsobuje omezení pohyblivosti a zvýšení T_g . [13]

Další faktory, které ovlivňují teplotu T_g , jsou ohebnost řetězců a jejich mezimolekulární soudržnost. Například polybutadien má ohebné řetězce a malou mezimolekulární soudržnost a má proto nízkou hodnotu T_g ($-100\text{ }^{\circ}\text{C}$). [14]

Teplota skelného přechodu se dá snížit přidáním změkčovadla do elektroizolační zalévací hmoty, což má za následek snížení mezimolekulárních sil. Dále se hodnota T_g dá snížit přidáním skupin látek, jako jsou benzenová jádra a alifatické řetězce. [13]

Existuje několik metod, jak určit Teplotu skelného přechodu. Mezi základní metody pro určení řadíme Diferenční termickou analýzu (DTA), Diferenční skenovací kalorimetrii (DSC), Termomechanickou analýzu (TMA) a Dynamickou mechanickou analýzu (DMA).

Diferenční termická analýza (DTA)

Diferenční termická analýza je technika, která měří teplotní rozdíl mezi látkou a tzv. teplotně inertním standardem jako funkci teploty, přičemž zkoumaná látka inertní standard jsou podrobeny řízenému teplotnímu programu. Za teplotně inertní standard je v oblasti termických analýz považována teplotně inertní substance, která nevykazuje žádné fázové přechody v oblasti teplotního rozsahu experimentu.

Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)

U této metody se zkoumaný vzorek podrobuje lineárnímu ohřevu a rychlost tepelného toku ve vzorku, která je úměrná okamžitému měrnému teplu, se plynule měří. Uvnitř měrného pláště, který je normálně udržován na pokojové teplotě, jsou vmontovány dvě symetrické nádoby. Vzorek obsahuje odporový teploměr a topný člen, které slouží jako kontrola systému. Sekundární teplotní kontrolní systém měří teplotní diferenci mezi oběma nosiči a tento rozdíl upravuje na nulový, kontrolou tepelného proudu, který je měřen. Dá se tedy říci, že teplota vzorku je udržována izotermně se vzorkem srovnávacím dodáváním tepla do vzorku srovnávacího. Toto množství, potřebné k udržení izotermních podmínek se zapisuje buď v závislosti na teplotě, nebo na čase.

Celý systém má malou tepelnou kapacitu a dovoluje tak použít velké rychlosti ohřevu a tím zajišťuje velkou rozlišovací schopnost. Před každým měřením by se měla provést tzv. stabilizace kalorimetru pro objektivní zpracování naměřených výsledků. Metoda DSC je nejpoužívanější v laboratořích tepelných vlastností. Pomocí této metody

můžeme stanovit teploty tání a krystalizace, teploty zesklennění, hodnoty krystaliniky, měrné tepelné kapacity atd.[9]

Termomechanická analýza (TMA)

Při Termomechanické analýze se měří deformace vzorku neoscilující silou jako funkce teploty, zatímco je látka vystavena řízenému teplotnímu programu. Existuje celá řada druhů měření, které závisí na druhu měřicí sondy. Volba vhodné sondy závisí především na tom, co od měření očekáváme, ale i na dalších faktorech, jako jsou například vlastnosti vzorku. Podle použité metody měření můžeme metodou *TMA* zjistit koeficient tepelné roztažnosti v určitém teplotním intervalu, teplotu skelného přechodu, teplotu měknutí a tavení materiálu, viskozitu tuhých látek, moduly pružnosti a další.

Dynamická mechanická analýza (DMA)

DMA sleduje viskoelastické chování materiálu zatíženého oscilující silou (obvykle má tato síla sinusový průběh) jako funkci teploty, zatímco je látka vystavena řízenému teplotnímu programu. Je to jedna z nejcitlivějších technik schopných charakterizovat a interpretovat mechanické chování materiálu.

S pomocí *DMA* můžeme stanovit a vyhodnotit několik parametrů, jako příklad může být teplota skelného přechodu, teplota tavení, hustota zesíťení atd.

Pro určení teploty skelného přechodu je Dynamická mechanická analýza považována za nejpresnější metodu, proto má pro testování elektroizolačních materiálů velký význam. Teplota skelného přechodu u epoxidových pryskyřic se pohybuje od 50 °C do 150 °C.[15]

1.3.1 Dielektrická termální analýza (DETA)

Epoxidová pryskyřice se také používá jako impregnační materiál na supravodivé magnety díky své mechanické pevnosti a dielektrickým vlastnostem. Výrobní vlastnosti, jako je viskozita, teplota, bod želatinace, doba vytvrzení jsou důležité nejenom pro výrobní účely, ale také pro dosažení fyzikálních vlastností. Fyzikální charakteristika se obvykle provádí pomocí Diferenční termické analýzy (DTA), Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) nebo i dynamické mechanické analýzy (DMA). Celý vytvrzovací proces lze však sledovat pomocí dielektrické termální analýzy (DETA).[16]

V experimentální studii byla Dielektrická termální analýza provedena u dvou vzorků epoxidové pryskyřice. Teplota se měřila pomocí termočlánku typu K umístěného na povrchu vzorku. DETA byla provedena při konstantní frekvenci 120 Hz a při napětí 2 voltů pomocí zesilovače jako generátoru signálu a citlivého detektoru. Úkolem detektoru je zaznamenat frekvenční křivky odezvy ze vzorku při pokojové teplotě. Měřené signály jsou napětí a fázové úhly mezi signálem odezvy a generátorem signálu. Z těchto signálů se vypočítává celková impedance, která se skládá z reálné a imaginární složky. Reální složka je spojena s elektrickým odporem, zatímco imaginární složka je spojena s kapacitou.

Citlivost odezvy signálu na reologické a chemické parametry je vysoce porovnatelná s kalorimetrickou metodou. Umožňuje však sledování teplotní závislosti viskozity v počáteční fázi vytvrzení tak dobře jako při hodnocení pomalých kroků ve vytvrzovacím procesu. Tato metoda má potenciál ve sledování kinetiky difúzních procesů, které mají vliv na konečné mechanické vlastnosti. V budoucnu se bude

používat pro vývoj nových epoxidových pryskyřic.[16]

1.4 Reakční kinetika epoxidových pryskyřic

Existují matematické modely, kterými můžeme popsat kinetiku dějů probíhajících v epoxidových pryskyřicích.

Kamalův model

Je to matematický model, který se nejčastěji používá v oblasti epoxidových pryskyřic. Jedná se o druh kinetického modelu, který popisuje chování epoxidu při autokatalytické reakci (exotermické vytvrzování). Kamalův model také popisuje síťování reaktoplastů. Rovnici Kamalova modelu uvádím níže.[13]

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \cdot \alpha^m) \cdot (1 - \alpha), \quad (1)$$

kde α je stupeň zesítnění epoxidu, m , n , jsou kinetické exponenty, k_1 , k_2 jsou reakční konstanty. Konstanty k_1 , k_2 jsou definovány pomocí Arrheniovy rovnice

$$k_i = A_i \cdot \exp\left(-\frac{E_{ai}}{RT}\right), \quad (2)$$

kde i má hodnotu 1 a 2, A_i je exponenční konstanta, E_{ai} označuje aktivní energie, R je univerzální plynová konstanta.

Macoskův model

Je to modifikovaný matematický model viskozity. Popisuje viskozitu závislou na teplotě a stupni zesítnění polymerní látky. U Macoskova modelu je zanedbán vliv rychlosti smykové deformace. Model je popsán rovnicí níže.

$$\eta = B \cdot \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \cdot \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha}\right)^{C_1 + C_2 \cdot \alpha}, \quad (3)$$

kde η je dynamická viskozita, B a T_b jsou kinetické parametry, α_g je prahová hodnota stupně zesítnění, C_1 , C_2 jsou kinetické parametry.

Množství tepla vygenerovaného chemickou reakcí se vypočítá pomocí následující rovnice. Množství vygenerovaného tepla závisí na stupni zesítnění a rychlosti průběhu chemické reakce.

$$\frac{dQ}{dt} = H_m \cdot \frac{d\alpha}{dt}, \quad (4)$$

kde Q je množství tepla vygenerované jednotkou hmotnosti, H_m je označení pro exotermickou konstantu a α je hodnota stupně zesítnění.[13]

1.5 Epoxidová pryskyřice v kompozitních materiálech

V oblasti kompozitních materiálů se používají epoxidové pryskyřice jako matrice pro vysoce kvalitní materiály v elektrotechnice. Pro své dobré izolační účinky se hodí optimálně pro desky plošných spojů, různé aplikace letectví a kosmonautice i v oboru elektroenergetiky, zvláště pro výrobu rotorových listů větrných elektráren.

Existuje mnoho výchozích složek pro kompozitní materiál vytvrzovaný za studena a za tepla, který vyhovuje nejrůznějším požadavkům, které mají v oblasti teploty skelného přechodu lepší vlastnosti než nenasycené polyesterové pryskyřice nebo vinylesterové pryskyřice.

Pro svou vysokou kvalitu a velmi dobré mechanické vlastnosti jsou epoxidové pryskyřice používány jako matrice pro vysokopevnostní vlákna, např. jako uhlíkové vlákna. Tyto vlákna jsou většinou součástí kompozitů používaných při stavbě letadel.

Kompozitní materiály na bázi epoxidových pryskyřic můžeme také použít jako elektroizolační zalévací hmoty v elektrotechnickém průmyslu. Tyto hmoty se nejčastěji používají k impregnaci vodičů a izolace vinutí transformátorů. Dále mají také široké použití v zalévacím procesu přístrojových transformátorů a senzorů vysokého napětí.[7]

1.5.1 Kompozitní materiály a jejich vliv na dielektrické vlastnosti

V oboru silnoproudých aplikací se často používají polymerní kompozity plněné mikročásticemi. V budoucnu bude stále kladen větší důraz na studium vlastností plniv používaných v nových izolačních systémech. Hlavní úkolem bude implementace nanoplňiv no již známých materiálů a následkem toho změna jejich elektrických vlastností. Budeme sledovat změny převážně následujících vlastností, a to změnu elektrické pevnosti, permitivity, ztrátového činitele, odolnosti proti částečným výbojům, elektrickým stromečkům a další.

V uvedené studii byl proveden následující experiment, který provedl úpravu epoxidové kompozitního materiálu. Jednalo se o epoxidovou pryskyřici doplněnou o nanoplňiva. Vzhledem k tomu, že ve studii bylo použito málo experimentálních vzorků, jsou výsledky u epoxidové pryskyřice sporné. U směsného (nano- mikro-) plniva byl zaznamenán vzrůst elektrické pevnosti, zatímco u běžného nanoplňiva byl zaznamenán pokles proti běžnému (mikro-) plnivu.

U ostatních sledovaných vlastností se nedá konkrétně říci, zda došlo ke zlepšení nebo zhoršení. Je tak proto, že výsledky nejsou jednoznačné. Závisí to velmi na úpravě nanoplňiv a také, jak ukázal experiment, na implementaci mikro, případně nanočástic do epoxidové hmoty.

Avšak i když nedošlo k jednoznačnému závěru, přínos tohoto experimentu je zásadní. Tyto kompozitní materiály na bázi epoxidových pryskyřic, doplněné o mikro-, případně nano- částice, mají velkou budoucnost v oblasti silnoproudých aplikací. Zvláště budou tvořit nové elektroizolační hmoty. Hlavní úkol bude spočívat v nalezení vhodných plniv do epoxidové pryskyřice, aby se její vlastnosti výrazně zlepšily dle požadavků elektrotechnického průmyslu.[17]

Dalším provedeným experimentem byla analýza elektrických vlastností epoxidové

pryskyřice doplněné o nanočástice oxidu titaničitého. Příprava vzorků epoxidových kompozitů je ve většině případů časově náročná. Formy, do kterých se odlévají vzorky, se musejí nejprve vytříit silikonovou vazelínou a dále se musejí zahřát na vyšší teplotu. Epoxidová pryskyřice je připravena v nádobě, do které se postupně přimíchávají nanoplňiva. Nanoplňiva jsou nejprve rozmíchána mechanicky, poté se míchají ve vodní lázni pomocí ultrazvuku. Takto připravená směs s nanoplňivem se musí řádně vakuovat, aby se odstranil ze směsi vzduch, který se dostal do směsi během míchání. Dále se hmota nalije do předeřáté formy. Následovalo další vakuování.[18]

Celý proces vytvrzování měl dvě fáze. V první fázi dochází nejprve k předtvrzení po dobu 3 hodin a při 90 stupních Celsia. Poté se vzorky vyjmou z formy, začistí se a následuje dotvrzení při teplotě 140 stupňů Celsia po dobu asi 10 hodin.

Je velmi obtížné zajistit, aby se částice ve hmotě rozptýlily rovnoměrně. Téměř vždy dochází k nerovnoměrnému rozmístění nanočástic, což má také vliv na výsledné vlastnosti celé hmoty.

Při měření byly sledovány teplotní závislosti vnitřní rezistivity, relativní permitivity a ztrátového činitele v teplotním rozsahu 20-120 stupňů Celsia.

Při měření bylo zjištěno, že velmi dobré vlastnosti má samotná epoxidová pryskyřice. Při teplotě 20 °C dosahuje vnitřní rezistivita hodnot řádově 10^{14} Ω m, ztrátový činitel je řádově 10^{-3} . U výsledného nanokompozitu je možno pozorovat při zvýšených teplotách nárůst hodnot vnitřní rezistivity a pokles relativní permitivity, a to pro vzorky s obsahem plniva 0,5 hmotnostních procent a 3 hmotnostní procenta.[18]

1.6 Elektroizolační zalévací hmoty

V technologii výroby produktů pro vysokonapěťové aplikace se elektroizolační zalévací hmoty používají nejčastěji pro zalévání transformátorů a další silnoproudé aplikace. Hlavní složku těchto hmot tvoří epoxidová pryskyřice. Hmoty se skládají z několika dalších složek a vytváří tak vlastně polymerní kompozitní materiál.

Hlavním důvodem použití epoxidových zalévacích hmot v elektrotechnickém průmyslu jsou velmi dobré vlastnosti pro tento druh technologie. Mezi vlastnosti patří vynikající ochrana proti vlhkosti a jiným vlivům prostředí, dobrá mechanická ochrana, velmi dobrá přilnavost k různým plášťům kabelů, nízká teplota reakce, rychlá vytvrditelnost, výborná odolnost proti chemikáliím, výborné elektrické vlastnosti, odolnost proti teplotním a mechanickým šokům, 100 % neporóznost a velmi dobré izolační účinky.[19]

1.6.1 Technologie výroby elektroizolačních zalévacích hmot

Při technologii procesu zalévání vysokonapěťových produktů hraje velkou roli výběr správné epoxidové pryskyřice. Mezi základní parametry, které ovlivňují technologické zpracování elektroizolační hmoty, řadíme vytvrzování, flexibilitu (ohebnost), teplotní klasifikaci a druh plniva (Aditiva).

Potenciální namáhání vyvolané během vytvrzování anebo vyvolané komponenty může způsobit poškození výrobku. Zde je poté nutné zvážit použití pružné, středně pružné nebo tvrdé pryskyřice. Jestliže bude produkt s aplikovanou pryskyřicí teplotně

nebo mechanicky šokově namáhán, je vhodné volit co nejflexibilnější pryskyřici v souladu s ostatními vyžadovanými parametry.

Výběr teplotní třídy pryskyřice musí být proveden v souladu se zamýšleným použitím celého komponentu a také jednotlivých dílů v komponentu, které by mohli ovlivnit technické vlastnosti pryskyřice během provozu zejména tepelnou zátěží.

V oblasti výroby, kde je nutné použít pryskyřici s co největší tekutostí z důvodu co nejlepšího zatékání do špatně přístupných míst, použijeme pryskyřici bez plnidel a tedy s nižší viskozitou. Pryskyřice s plnidly používáme všude tam, kde chceme redukovat smrštění materiálu. Nižší exotermické vlastnosti a vyšší odolnost vůči teplotním šokům a tam, kde zvýšená viskozita pryskyřic nebrání aplikaci plnicími stroji. Tam, kde je potřeba použít pryskyřice s nízkým stékáním, používáme pryskyřice s tixotropickými vlastnostmi. Druh tixotropické pryskyřice se chová po smíchání obou složek jako nestékavá pasta.

K těmto čtyřem uvedeným parametrům je nutné před návrhem použití epoxidové pryskyřice přičíst další faktory, které mohou ovlivnit výběr typu pryskyřice zejména u fyzikálních a elektrických vlastností. Viskozita pryskyřice by měla být vhodnou volbou dle potřeb aplikačního procesu. Kde je potřeba pryskyřice s nízkou viskozitou, např. impregnace vinutí, pryskyřice by měla být aplikována na předehřátý komponent z důvodu redukování počátečního stavu viskozity.

Při výběru správného druhu pryskyřice může nastat řada technologických problémů. Další problémy nastávají i při aplikaci konkrétní pryskyřice v technologickém procesu. Popis nejčastějších problémů vyplývajících z technologie výroby při použití epoxidových pryskyřic uvádím v tabulce níže. Tabulka zahrnuje i technologické problémy při použití práškových pryskyřic a dále popis příčiny jednotlivých problémů a konkrétní návrh řešení, který dokáže problémy odstranit, případně celý proces výroby zlepšit.[19]

Tab. 1 Technologie výroby epoxidových pryskyřic, převzato z [19]

Problém	Příčina	Řešení
Unikající vzruch v pryskyřici v podobě bublin z malých škvír během vytvrzování	Zachycení vzduchu v pryskyřici	Změnit teplotu předehřátí nebo vytvrzení
	Nečistoty, zbytky oleje, maziva, činidel aj. na povrchu nebo mezi vrstvami	Důkladné vyčištění před aplikací
	Prášková pryskyřice je zvlhlá	Skladovat v uzavřeném stavu nebo použít vysušený vzduch k aplikaci
Nízká přilnavost, pryskyřice neulpívá na aplikovaný díl	Nečistoty, zbytky oleje, maziva, činidel aj. na povrchu nebo mezi vrstvami	Důkladné vyčištění před aplikací
	Nepřichytávající materiál	Změna materiálu
	Pryskyřice není plně vytvrzena	Kontrola vytvrzovací teploty nebo důslednost vytvrzení a dobu vytvrzení
Slabá odolnost vytvrzené pryskyřice, vrstva se láme a praská	Nečistoty, zbytky oleje, maziva, činidel aj. na povrchu nebo mezi vrstvami	Důkladné vyčištění před aplikací

	Pryskyřice není plně vytvrzena	Kontrola vytvrzovací teploty nebo důslednost vytvrzení a dobu vytvrzení
Nízká odolnost tepla a tepelná vodivost během aplikování pryskyřice	Tepelná vodivost dílu je nízká	Použít produkt s vyšší teplotní kapacitou
	Pryskyřice není plně vytvrzená	Kontrola vytvrzovací teploty nebo důslednost vytvrzení a dobu vytvrzení
Nízká chemická odolnost, vrstva se rozpouští nebo hrudkovatí při styku s chemikálií	Pryskyřice není plně vytvrzená	Kontrola vytvrzovací teploty nebo důslednost vytvrzení a dobu vytvrzení
Vrstva se projevuje ve škvírách jako hrubá nebo má tendenci tvořit zvrásněný povrch	Kontaminace prášku	Kontrola prášku, obsah zbytků ropných látek nebo vody, skladovat na čistém místě
	Skladovací teplota je příliš vysoká	Skladovat při pokojové teplotě
	Pryskyřice je zestárlá	Kontrola skladovatelnosti a doby použitelnosti
	Nedostatečné promíchání pryskyřice	Složky dodatečně promíchat
	Teplota předehřátí je nízká	Zvýšit teplotu předehřátí
	Příliš mnoho vzduchu během vzdušného promíchání	Snižte průtok vzduchu
Vrstva Vytvořená aplikací pryskyřice je příliš nízká	Skladovací teplota je příliš vysoká	Skladovat při pokojové teplotě
	Pryskyřice je zestárlá	Kontrola skladovatelnosti a doby použitelnosti
	Nedostatečné promíchání pryskyřice	Složky dodatečně promíchat
	Teplota předehřátí je nízká	Zvýšit teplotu předehřátí
	Díl je příliš vzdálen od aplikátoru	Snížit vzdálenost od aplikátoru
	Nanášení pryskyřice je krátké	Prodloužení doby nanášení
	Příliš mnoho vzduchu během vzdušného promíchání	Snižte průtok vzduchu

Při aplikaci elektroizolačních zalévacích hmot na bázi epoxidových pryskyřic nastávají další problémy, které se během technologického procesu musí řešit. Je zapotřebí řešit návrh designu výrobku a v neposlední řadě také design zalévací formy.

Další velkou úlohou je nastavení vhodných parametrů zalévacího procesu, a to zvláště plnění formy, teplotu předehřátých částí a topných desek licího stroje, teplotu epoxidové směsi, průběh tuhnutí epoxidu, exotermickou reakci, chemické smrštění a další.

Během výroby vysokonapěťových produktů dochází k několika nežádoucím jevům, kterým je potřeba věnovat také velkou pozornost. Ve většině případů se jedná o magnetostriktci, částečné výboje, praskání odlitku a stárnutí epoxidu.

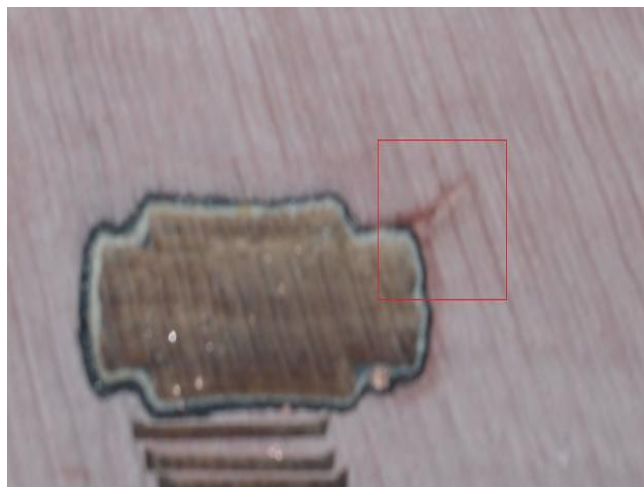
Magnetostrikce představuje změny vlastností jádra transformátoru v důsledku

zvýšeného tlaku během zalévacího procesu a během chemického, případně tepelného smršťování epoxidů.

Dalším úskalím jsou nízké teploty, při kterých dochází k praskání odlitku, během a po dotvrzování. Teploty, při kterých praskají epoxidové odlitky, se pohybují kolem -50 až -60 stupňů Celsia.

Nežádoucím jevem, který se objevuje při technologickém procesu, je stárnutí epoxidových zalévacích hmot, což představuje změnu fyzikálních vlastností v čase. Tyto změny ve většině případů ovlivňují negativně výsledný produkt. Neméně důležité jsou takové částečné výboje, které jsou popsány v kapitole níže.[19]

Na následujících obrázcích můžeme vidět trhlinu a izolační průraz, ke kterým může dojít ve výrobním procesu při aplikaci elektroizolačních zalévacích hmot po vytvrzení.



Obr. 8 Trhlina v elektroizolační hmotě



Obr. 9 Izolační průraz v elektroizolační hmotě

1.7 Degradací procesy v elektroizolačních hmotách

Na každý elektroizolační systém jsou kladeny velké nároky z hlediska jeho spolehlivosti a bezporuchové činnosti. Kvalitní izolační systém musí splňovat náročné elektroizolační vlastnosti, do kterých řadíme zejména vnitřní a povrchovou rezistivitu, permitivitu, ztrátový činitel, průrazné napětí a další. Kromě těchto vlastností musí být systém odolný také vnějším vlivům, do kterých patří chemické látky, teplota, sluneční záření, plynné exhalace a mechanické namáhání. Je velmi důležité se jednotlivými degradačními procesy zabývat podrobně, aby bylo dosaženo co nejlepších vlastností elektroizolačních systémů a byly případně odstraněny negativní vlivy těchto procesů. Mezi nejznámější degradační procesy v izolačních systémech řadíme částečné výboje a elektrické stromečky a vliv ostatních klimatických činitelů.

1.7.1 Částečné výboje

O častém výboji můžeme hovořit v případě, že se jedná o částečný průraz izolace v plynném izolantu. V plynném prostředí kolem vodičů, které jsou vzdálené od pevné nebo kapalné izolace se objevuje částečný výboj, tzv. Koróna. Tento termín by měl být používán správně pro všechny formy částečných výbojů.

V izolaci elektrotechnických strojů se můžou objevit malé dutinky vyplněné plynem. Takovéto dutinky můžou vzniknout poškozením izolace, případně ve výrobním procesu účinkem velkého lokálního elektrického namáhání. Pokud se na objekt, který má v izolaci tyto dutinky, postupně zvyšuje přiložené napětí, dochází v těchto dutinkách k vytvoření výbojů, které mívají charakter lavinových nebo drobných jiskrových výbojů.

Částečný výboj je tedy přesně definovaný jako lokalizovaný elektrický výboj, který pouze částečně přemostuje izolaci mezi vodiči a který se může nebo nemusí objevit v okolí vodiče.[20]

Částečné výboje můžeme obecně rozdělit podle místa jejich výskytu na následující druhy výbojů:[21]

Vnější částečné výboje

Jsou částečné výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo velkých zakřivení, jako např. doutnavé a korónové výboje.

Vnitřní částečné výboje

Jsou výboje v plynech, obklopené pevným či kapalným dielektrikem, jako např. výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku.

Povrchová částečné výboje

Povrchové částečné výboje se nacházejí v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika, jsou jimi např. klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážky v točivých strojích, průchodkách apod.[21]

1.7.2 Degradace epoxidové pryskyřice částečnými výboji

Epoxidové pryskyřice jsou hlavní komponenty v izolačních systémech. Následující

experimentální práce měla za úkol sledovat změny epoxidové pryskyřice. Jednalo se o diglycerid Bisfenolu A vytvrzený ftalovým anhydridem.[22]

Vzorky pryskyřice byly umístěny do zkušební komory, kde byly vystaveny působení částečných výbojů. Desky z pryskyřice byly 1 mm silné. Byly položeny na desce a asi 2 mm nad jejich povrchem byla umístěna elektroda vysokého napětí. Bylo přiloženo napětí 10 kV po dobu 50 hodin. Během této doby byly sledovány změny na povrchu vzorků. Byla použita uzavřená testovací komora, která umožňovala během sledování změn měnit atmosféru uvnitř komory. Bylo prostřídáno suché prostřední, dále testování za běžných podmínek, při vlhkosti vzduchu a za přítomnosti dusíku.

Vlhký vzduch byl vytvořen uzavřením otevřeného kontejneru v komoře, který obsahoval horkou vodu. Suchý vzduch zahrnoval množství silikagelu. Obecně se dá říci, že z podmínek uvedených výše byl dusík nejméně škodlivý na povrch vzorků pryskyřice. Za přítomnosti částečných výbojů, měla vlhkost vzduchu nejhorší účinek na povrch vzorků.[22]

1.7.3 Elektrické stromečky

V elektroizolačních materiálech dochází k negativnímu jevu, který označujeme jako tzv. „elektrické stromečky“. K jejich výskytu dochází vlivem působení elektrického pole o dostatečné intenzitě. V takovém případě dojde ke vzniku vodivých cest. Stromečkovité kanálky mohou být duté nebo jsou tvořeny degradačními zplodinami, které vznikly rozkladem materiálu elektrické izolace. Tento druh zplodin je ve většině případů elektricky vodivý. V dutinách se mohou objevovat také kapaliny. Tato kapalina se může do materiálu vstřebávat z okolí, případně může vzniknout jako produkt chemických reakcí spojených s degradací.[23]

Vlivem působení částečných výbojů dochází k růstu elektrického stromečku a může v izolačním materiálu dojít až k průrazu. Kanálky elektrických stromečků mohou být vyplněny plynem nebo degradačními zplodinami, které jsou často elektricky vodivé. V některých případech mohou kanálky obsahovat kapaliny, které mohou do izolačního materiálu proniknout z okolí, nebo mohou být produktem chemických reakcí uvnitř materiálu.

Průběh vzniku elektrického stromečku uvnitř izolačního materiálu je nejčastěji simulován a zkoumán pomocí hrotu jehly a uzemňovací elektrody vložené do krychličky materiálu z epoxidové pryskyřice a svým tvarem může připomínat strom nebo keř. Růst elektrických stromečků se dá rozčlenit do třech fází.[23]

Fáze první

Je detekovatelná jen za pomoci speciálních, velmi citlivých přístrojů a jedná se o začátek růstu stromečku.

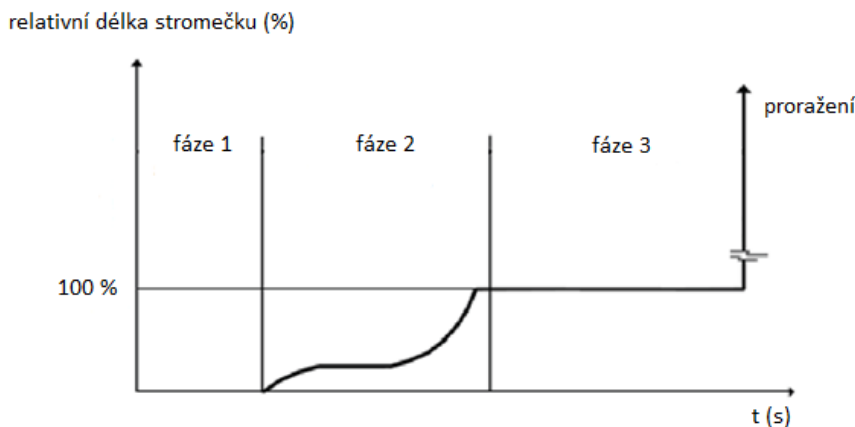
Fáze druhá

Druhá fáze nastává od okamžiku, kdy je vytvořena první větev stromečku. Z první větve se začnou rozvětňovat další, které směřují a postupují k uzemňovací elektrodě. Druhá fáze končí okamžikem, kdy se vodivý kanálek dotkne uzemňovací elektrody. V této fázi nedochází k elektrickému průrazu, jelikož elektrická vodivost kanálku (malé větve elektrického stromečku) je nedostatečná pro průrazný proud. Průměr těchto malých větví (kanálků) je menší než 10 μm.

Fáze třetí

Je intervalem prvního spojení elektrod a průrazem dielektrického materiálu. V této části se vodivé kanálky rozvětvují a rozšiřují na průměr větší než 10 m. Tyto kanálky jsou již duté, a jakmile jeden celý dutý kanálek propojí obě elektrody, dojde k průrazu dielektrika.[23]

Následující obrázek popisuje fáze růstu elektrických stromečků v izolaci.



Obr. 10 Fáze růstu elektrických stromečků

1.7.4 Vliv klimatických činitelů

Pro každé prostředí, ve kterém je používána epoxidová pryskyřice, existuje vždy soubor degračních činitelů. Většinou se jedná o vlhkost, teplotu, sluneční záření, tlak, vzduchu, prach a písek, aerosol a různé druhy mikroorganismů či makroorganismů. V průmyslovém prostředí se k výše vyjmenovaným degračním činitelům přidávají ještě exhalace. Dále při provozu zařízení degradují materiál i činitelé elektrického původu, jako je elektromagnetické pole, přepětí, zkraty atd. Rovněž můžou způsobit degradaci i činitelé mechanického původu, kam řadíme chvění, vibrace, akustický tlak. Velký vliv mají také různé formy záření.[24]

Níže uvádím popisy hlavních degračních činitelů:

Kyslík

21 % ovzduší tvoří kyslík. Je aktivním činitelem všech oxidačních a redukčních procesů, podporuje stárnutí izolačních částí vyrobených z organických látek (při čemž jde o procesy převážně oxidační) a urychluje atmosférickou korozi kovových materiálů, zejména za působení vlhkosti a znečištění atmosféry.

Teplota

Velmi negativně mohou působit vysoké, ale i nízké teploty okolního prostředí. Případně i teplota vyšší než je teplota okolního prostředí, která je způsobena ztrátami elektrické energie vznikajícími v elektrických zařízeních.

Vysoká teplota urychluje průběh většiny korozních dějů. Má za následek stárnutí organických materiálů, především izolantů tepelně namáhaných, způsobuje měknutí termoplastů, zalévacích látek a tmelů s nízkým bodem měknutí. S poklesem teploty klesá i pružnost látek, které tím tvrdnou a křehnou, vzrůstá také pevnost v tahu, klesá však tažnost a tím i u některých látek odolnost proti rázovému namáhání. Kdežto rychlá

změna teplot způsobuje rychle se měnící rozměry materiálu, a tím dochází k popraskání a porušení těsnosti.

Záření

U izolačních materiálů vystavených dlouhodobě slunečním paprskům dochází ke světelnému stárnutí, které má za následek sluneční záření. Pohlčená část slunečního záření může vyvolávat fotochemickou a fotooxidační degradaci materiálu.

Ultravioletové záření způsobuje především u izolantů organické povahy rozpraskávání a vytváření trhlin na povrchu některých materiálů. Může také způsobit ztvrdnutí a zkrhnutí materiálů, případně změnu samotné barvy materiálu.

Infračervené záření může u izolantů vyvolat tepelný průraz, protože zapříčiňuje ohřev vrchních částí materiálu a má za následek změnu elektrických a fyzikálních vlastností, což je samotná degradace materiálu.

Vlhkost

Atmosféra je hlavním zdrojem vlhkosti. Většina vlastností kapalných a pevných se působením vlhkosti a vody zhoršuje. Pokud dojde pevná látka do styku s vlhkostí, nastávají v takovém případě dva děje. Prvním dějem je adsorpce vody na povrchu látky a druhý děj je absorpce vody do objemu látky. Může také dojít k vyluhování některých složek z izolantu, což má za následek nastartování koroze dalších částí celého zařízení.

Vlhkost zhoršuje dielektrické vlastnosti vzduchu a izolantů. Na druhou stranu nesmí být vlhkost ani příliš nízká, aby nedošlo k vysoušení prostředí a k vysychání některých materiálů. Takového vysychání je často provázáno změnami objemu, různé druhy deformace a změny vlastností povrchu materiálů.[24]

1.8 Složení zalévacích hmot

Elektroizolační zalévací hmoty se skládají ze šesti komponent, které vytvářejí výslednou licí směs. Složení je důležité volit vhodným způsobem, aby bylo dosaženo co nejlepších vlastností. Licí směsi obsahují epoxidovou pryskyřici, tvrdidlo, plnivo, urychlovače, barvivo a změkčovač.

Tvrdidlo je látka, která se účastní polymerní reakce s epoxidovou pryskyřicí. Je nezbytná pro požadovanou reakci a jejich přidavek vede k zesíťování struktury spojenému s vytvrzením.

Plnivo tvoří přísada ovlivňující vlastnosti licí směsi i výrobku. Plniva jsou práškové nebo granulované látky používané pro dosažení požadovaných mechanických vlastností (pevnosti, tuhosti, tvrdosti, houževnatosti), tepelné odolnosti nebo vzhledu polymeru. Některé plniva také snižují cenu polymeru.

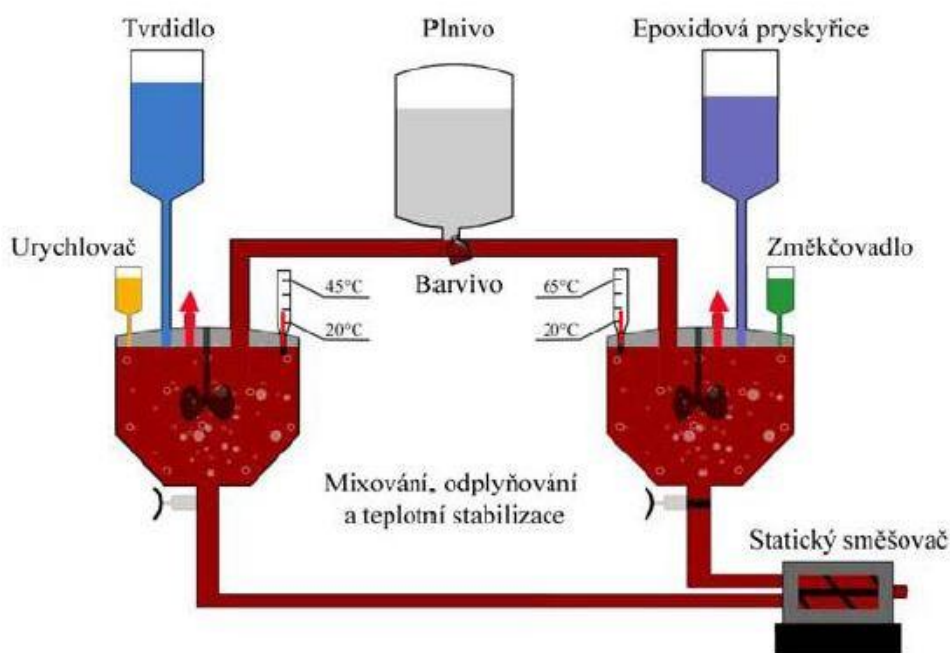
Barvivo se přidává do licích směsí jako látka, která vytváří finální barvu produktu. Jako barviva se používají organické i anorganické látky.

Poslední složkou je změkčovač, který ovlivňuje Teplotu skelného přechodu a některé mechanické vlastnosti odlitku. Snižuje tvrdost, tuhost a křehkost polymerů. Změkčovač zlepšuje zpracovatelnost polymerů, neboť snižují teploty nutné pro jejich tvárění a zlepšují tvářitelnost. Jako změkčovač se používají ftaláty, fosfáty, estery mastných kyselin atd.[13]

Změkčovadla jsou málo těkavé organické látky, které poskytují polymerům ohebnost, tvárnost, vláčnost a snižují teplotu T_g a viskozitu jejich taveniny. Principem působení změkčovaadel na polymery je zvyšování tzv. vnitřní pohyblivosti jejich makromolekulárních řetězců, která určuje tuhost a teplotu T_g polymerů a která je dána jednak ohebností makromolekul, jejich vzájemnou přitažlivostí, tj. velikostí mezimolekulárních sil, která zase závisí na vzdálenosti makromolekul mezi sebou. [6]

1.8.1 Příprava vzorků zalévacích hmot

Celý proces začíná přípravou zalévací hmoty. Hmota se vyrobí tak, že se vytvoří dvě základní hmoty. První obsahuje tvrdidlo spolu s urychlovačem. Druhá obsahuje epoxidovou pryskyřici a změkčovadlo. Do obou základních hmot se přimíchává ještě plnivo. Poté se musí jednotlivé hmoty řádně promíchat a vakuovat při vyšší teplotě. Dochází k mixování, odplyňování a teplotní stabilizaci hmot. Obě takto připravené hmoty jdou do statického směšovače, kde se navzájem smíchají a tím se nastartuje polymerní reakce. Ze statického směšovače jde již připravená hmota do autoklávu. Celý proces je zobrazen na Obr. 11.



Obr. 11 Příprava licí hmoty, převzato z [13]

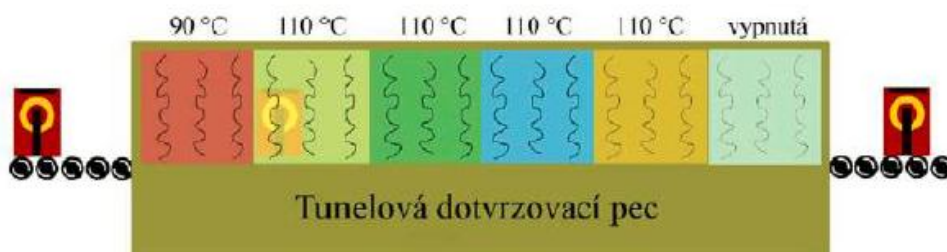
Před samotným odléváním forem je důležitá jejich příprava. Ta probíhá tak, že se rozložená forma vyčistí separátorem, sestaví se a je připravena pro naplnění hmotou. Separátor je silikonový prostředek. Poté se forma naplní připravenou hmotou.

Po vytvrzení v peci se forma vytáhne, rozmontuje se a odlité vzorky se vytáhnou ven. Vzorky se musí začistit nožem a odnést do laboratoře na další dotvrzení, kde stráví asi 14 hodin při teplotě 160 stupňů Celsia. Formy se musí znovu rozložit, vyčistit

separátorem a připravit pro další sadu vzorků. Vzorky se připravovali ve třech formách. Dvě formy pro mechanické zkoušky, tedy příprava tyčinek a „kostí“. Jedna forma pro elektrické zkoušky.

1.9 Technologie procesu zalévání

V současné době se používají při zalévacím procesu vysokonapětových produktů dvě metody. Jsou to metody Tlakového lití (APG) a vakuového lití (VAC). U metody APG jsou dvě nebo více reakčních složek promíchány s dalšími komponenty. Následuje homogenizace a odplyňování základních složek. Poté je takto připravená směs zavedena prostřednictvím vstřikovacího systému do předehřáté formy. Polymerizace směsi materiálu vytváří dodatečné teplo a komponenty směsi se stanou tvrdší a tím se získá požadovaný tvar výrobku. Poté probíhá vyformování, které se provádí dalším teplotním zpracováním, aby se dosáhlo úplného dotvrzení. Velmi často se k finálnímu dotvrzení používá tunelová pec. Doba dotvrzování je zhruba 12 až 20 hodin. Tunelová dotvrzovací pec je zobrazena na Obr. 12.[25]



Obr. 12 Tunelová dotvrzovací pec, převzato z [26]

Druhou metodou je vakuové lití (VAC). Při vakuovém lití nejprve proběhne předehřev formy a vnitřních částí. Předehřátá forma se umístí do vakuové komory a naplní se epoxidovou hmotou. Dále proběhne evakuování, aby se z formy odstranil vzduch a tím se minimalizoval výskyt bublin, které snižují kvalitu samotného výrobku. Po evakuování ve vakuové komoře se forma umístí do tunelové pece, kde probíhá dotvrzení a ochlazení. Oproti metodě APG má VAC své výhody a samozřejmě i jisté nevýhody. Mezi výhody VAC patří zejména nepřítomnost vzduchu, který se odstraní ve vakuové komoře. Tím odpadá riziko vytvoření vzduchových bublin v zalévací hmotě, čímž dojde ke zvýšení kvality výrobku a lepším vlastnostem epoxidové izolační hmoty. Mezi nevýhody patří delší výrobní časy této metody a je zapotřebí také skladovat větší množství forem.[25]

1.9.1 Numerické simulace licího procesu

Pro správnou výrobu vysokonapětových produktů metodou APG je důležité správné nastavení parametrů samotného procesu, design formy a dílčí části licího procesu musí být nastaveny optimálně. Jednou z nejučinnějších metod umožňující zkoumání, zlepšování a optimalizování všech parametrů jsou numerické simulace procesu

zalévání. Simulace procesu zalévání můžeme rozdělit do třech fází.[26]

První fází je přehřev formy a topných desek. Výpočet přehřevu formy a topných desek je řešen pouze rovnicemi přenosu tepla v ustáleném stavu. Výstupem těchto rovnic je teplotní profil na formě a topných deskách, které jsou součástí počátečních podmínek pro další výpočet.

Druhou fází je plnění formy epoxidovou pryskyřicí. Pro tento výpočet je zapotřebí znát data z první fáze, tedy teplotní profil na formě a topných deskách. Dále jsou nutné pro výpočet materiálové konstanty epoxidu, vzduchu, pevných částí, rychlost proudění a teplota epoxidu na vstupu do formy a hodnoty kinetických exponentů a konstant. Samotným výpočtem je počítání laminárního proudění pomocí řešených rovnic proudění, přenosu tepla a reakční kinetiky. Výstupem těchto rovnic je průběh plnění formy, distribuce teploty v epoxidové hmotě a aktivních částech a dále stupeň gelace epoxidové pryskyřice.

Poslední fází je gelace epoxidové pryskyřice. Vstupní data pro samotný výpočet v této fázi jsou všechna výstupní data z fáze plnění formy a materiálové parametry epoxidu, vzduchu, pevných částí a dále hodnoty kinetických exponentů a konstant. Při výpočtu se počítají rovnice přenosu tepla a reakční kinetiky. Samotným výpočtem se dá zjistit průběh gelace epoxidové pryskyřice, distribuce teploty v epoxidové hmotě a aktivních částech a také objem tekuté hmoty v okamžiku zatuhnutí vtokového kanálku.

Numerické modelování APG procesu přináší řadu výhod. Mezi hlavní výhody patří optimalizace výrobního procesu, možnost zkoumání fenoménu proudění a gelace epoxidové hmoty, nižší zmetkovitost, optimalizace tvaru aktivních částí zalévacího zařízení a optimalizace formy a kratší doba vývoje nových produktů, případně zlepšení stávajících produktů.

Do budoucna se bude práce v oblasti numerických simulací APG procesu zdokonalovat zvláště v oblasti aplikace Macoskova modelu viskozity, řešení chemického smršťování epoxidové hmoty během gelace, zdokonalení modelu a aplikace více metod pro ověření výsledků simulace.[26]

1.10 Vlastnosti elektroizolačních zalévacích hmot

Tepelné vlastnosti

Sledování tepelných vlastností licích směsí je důležité zvláště v případech, kdy odlitky jsou vystaveny v provozu zvýšené teplotě, často doprovázené mechanickým namáháním. V tomto případě dochází u každé směsi v určitém intervalu teploty k jejímu měknutí, což může vést k poškození odlitku.[5]

Tvarová stálost za tepla

Slouží pro porovnání jednotlivých materiálů a jejich chování při proměnné zvýšené teplotě a jsou založeny na deformaci zkušebního tělesa. Často se tvarová stálost za tepla ztotožňuje s trvalou tepelnou vodivostí, což je velká chyba.[5]

Tepelná vodivost

Tepelná vodivost charakterizuje schopnost materiálu vést teplo z teplejší části do chladnější. Tento proces je popisován Fourierovým zákonem, který má pro

jednorozměrný případ tvar:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (5)$$

kde q je tepelný tok (množství tepla, které projde za jednotkový čas jednotkovou plochou), dT/dx teplotní gradient a λ je měrná tepelná vodivost. Znaménko mínus znamená, že teplo se šíří ve směru klesající teploty (záporného teplotního gradientu). Jednotka lambdy je $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Na přenosu tepla v polymerech, sklu a keramice se nepodílejí elektrony, ale spíše vibrační pohyb atomů. Kromě toho některé keramické i polymerní materiály obsahují značný podíl pórů vyplněných vzduchem, který má velmi malou tepelnou vodivost. Proto mají tyto materiály obvykle nižší tepelnou vodivost, než kovy.

Měrná tepelná vodivost

V elektrotechnice je tato veličina zvláště důležitá. V zalitých zařízeních, jako jsou cívky a transformátory, vzniká teplo, které je nutno odvést, aby nedošlo k přehřátí. Pokud je celá součást hermeticky uzavřená, zvláště z důvodů mechanických nebo elektroizolačních, plní tuto funkci lící směs. Epoxidy mají oproti kovům tepelnou vodivost o dva až tři řády nižší, tím se řadí do skupiny tepelně izolačních materiálů.

Tepelná roztažnost

Tepelná roztažnost popisuje nárůst rozměrů materiálu s rostoucí teplotou. Ohřejeme-li materiál z teploty T_0 na teplotu T_1 , pak nárůst jeho rozměrů (délky) z L_0 na L_1 popisujeme rovnicí:

$$\frac{L_1 - L_0}{L_0} = \alpha(T_1 - T_0), \quad (6)$$

Relativní nárůst délky (vztažený na původní hodnotu) je tedy přímo úměrný rozdílu teplot. Konstanta úměrnosti α se nazývá koeficient teplotní délkové roztažnosti.[13]

Koeficient délkové teplotní roztažnosti (α)

Za různých podmínek je důležité znát koeficient délkové teplotní roztažnosti (α), protože určuje změny odlité součásti při změnách teploty a z nich pak velikosti mechanického napětí odlitku, zvláště v případě, kdy odlitek obsahuje zalitý předmět s rozdílným koeficientem α , nejčastěji se jedná o kov.[5]

Elektrické vlastnosti

Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je závislá především na teplotě, tloušťce izolantu, druhu napětí (střídavém nebo stejnosměrném), době namáhání a na elektrickém poli. U tuhých izolantů vedle elektrického průrazu může nastat ještě průraz tepelný, vlivem zahřátí izolantu v elektrickém poli vzniklými ztrátami. To způsobuje zvětšení průchozího proudu s dalším následným zvýšením teploty až do průrazu. [5]

Elektrický odpor

Pomocí měření se určuje vnitřní a povrchový elektrický odpor. Ovšem jako materiálový

parametr slouží hodnoty rezistivity, které se vypočítají z naměřených hodnot. Pro posouzení materiálu se nejčastěji používá odpor vnitřní, protože povrchový odpor je závislý na stavu povrchu izolantu. Povrch může být nějakým způsobem poškozený, např. zaprášený, navlhlý nebo poškozený při zpracování.

Hodnoty měrného vnitřního elektrického odporu s rostoucí teplotou klesají čím rychleji, čím nižší je přechodová oblast T_g . Elektrický odpor se mírně snižuje, pokud se směs plní elektroizolačním materiálem, jako je např. mletý tavený křemen.

Ztrátový činitel a relativní permitivita

Ztrátový činitel u epoxidů je závislý na teplotě, intenzitě elektrického pole, kmitočtu, homogenitě odlitku a čistotě směsi. Ztrátový činitel roste se zvyšující se teplotou i napětím, přičemž k rapidnímu růstu dojde v přechodové oblasti materiálu.

Relativní permitivita má malou závislost na intenzitě elektrického pole i teplotě. Výraznější vliv na hodnotu relativní permitivity licí směsi má druh a množství plniva.[5]

Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti nám charakterizující materiál, pokud na něj působí mechanické síly. V případě, že je materiál zatěžován takovou silou, postupně mění svůj tvar a začíná se deformovat. Existují dva druhy deformací. Deformace pružná (vratná, elastická), kdy se materiál po odlehčení vrátí zpět do původního stavu. Naopak u deformace trvalé (plastické) zůstává materiál zdeformován i po odstranění zatížení. Pokud zatěžující sílu zvyšujeme, materiál se deformuje stále více, až se nakonec poruší lomem.[4]

Deformace materiálu přináší změnu jeho tvaru vlivem mechanického namáhání a závisí na velikosti i druhu namáhání. Existuje několik druhů namáhání a deformací, jako příklad uvádím namáhání a deformaci v tahu, v tlaku, ohybu, krutu nebo ve smyku. V práci se dále zaměřím na tah, tlak a ohyb. Pro vysvětlení deformačního chování materiálu se nejvíce využívá namáhání v tahu. V případě, že máme vzorek ve tvaru tyčinky a natahujeme jej ve zkušebním zatěžovacím stroji stále zvyšující se silou až do jeho přetržení, získáme tak tahový diagram.

Tahový diagram slouží pro vynesení závislosti smluvního napětí v tahu σ působícího na materiál na jeho relativním prodloužení ϵ . Smluvní napětí v tahu je tahová síla F vztažená na počáteční průřez vzorku S_0 . Má rozměr tlaku a nejčastěji se udává v MPa. Relativní prodloužení je prodloužení $L - L_0$ vztažené na počáteční délku vzorku L_0 a udává se v procentech. Pro reaktoplasty má tahový diagram lineární průběh až do přetržení vzorku. To má za následek, že se materiály deformují až do přetržení pouze pružně (elasticky) a poměrně málo. Nejsou schopny trvalé (plastické deformace). Plastické deformace jsou schopny pouze kovové materiály a termoplasty.

$$\sigma = \frac{F}{S_0}, \quad (7)$$

kde σ je smluvní napětí, F je přiložená síla a S_0 je průřez vzorku.

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} 100, \quad (8)$$

kde ϵ je relativní prodloužení a L_0 je počáteční délka vzorku.

Další možností je stanovení mechanických vlastností při tlaku a ohybu. Při namáhání v tlaku na materiál působí zvyšující se tlaková síla až do jeho rozdrčení. Napětí v tlaku σ_{TL} je pak definováno vztahem:

$$\sigma_{TL} = \frac{F_{TL}}{S_0}, \quad (9)$$

kde F_{TL} je tlaková síla a S_0 je průřez vzorku.

Pro napětí v ohybu uvažujme příklad, že máme vzorek materiálu s průřezem ve tvaru obdélníku o stranách b a d a tento vzorek se namáhá silou v ohybu F_0 . Potom se napětí v ohybu σ_0 vypočítá touto rovnicí:

$$\sigma_0 = \frac{3F_0L}{2bd^2}, \quad (10)$$

kde L je vzdálenost mezi oběma podpěrami, které drží vzorek.

V oblasti pružné deformace je závislost napětí σ na relativním prodloužení ϵ lineární a popisuje ji Hookův zákon:

$$\sigma = E \cdot \epsilon, \quad (11)$$

kde E je modul pružnosti v tahu.

V závislosti na typu namáhání existují rovněž moduly pružnosti v tlaku, ohybu a další. Modul pružnosti je velmi důležitá vlastnost materiálu, která charakterizuje jeho tuhost. Materiály, které mají vysoký modul pružnosti, se málo a špatně deformují, a to i při působení velkých sil. Naproti tomu materiály s nízkým modulem pružnosti jsou snadno deformovatelné a stačí k tomu malá síla.

Modul pružnosti byl definován jako směrnice tahové křivky v elastické oblasti. Moduly pružnosti materiálů se výrazně liší v závislosti na tom, jak snadno se mohou atomy nebo molekuly v materiálu vychýlovat při zatížení ze svých rovnovážných poloh. Modul pružnosti se zvyšuje s rostoucí pevností chemických vazeb v materiálu. V materiálech anorganických nebo v kovech s vysokými teplotami tání jsou silné kovalentní, iontové nebo kovové vazby, proto mají takové materiály i velké moduly pružnosti. Naproti tomu malé hodnoty modulu pružnosti mají polymerní materiály, a to proto, že dlouhé makromolekuly mají schopnost poměrně značných tvarových změn při zatížení. [4]

1.11 Mechanické zkoušky elektroizolačních zalévacích hmot

Principy zkoušení plastů vycházejí vesměs z metod zkoušení kovových materiálů, s tím rozdílem, že respektují některé specifické odlišnosti v jejich vlastnostech.

Při zkoušení plastů je potřeba dávat pozor na jejich viskoelastické chování, což

znamená při statických zkouškách dodržovat rychlosti zatěžování, popřípadě dobu působení plného zatížení. Vzhledem k omezené tvarové stálosti za tepla a křehkosti za nízkých teplot se mechanické zkoušky plastů provádí v celé teplotní závislosti a přechodových oblastech v širším teplotním rozsahu.

Dále se také u mechanických zkoušek plastů uplatňují některé typy zkoušek, které se u kovů neprovádí. Jsou to například speciální postupy, které umožňují rychlé posouzení tvarové stálosti plastů za tepla. Při takovémto druhu zkoušky, se těleso ohřívá stanovenou teplotou, je namáháno stálým ohybovým napětím, nebo se do něj vtlačuje jiný předmět. Výsledkem takové zkoušky je měřítko tvarové stálosti za tepla, při kterém se dosáhne smluvní velikosti průhybu nebo vtisku.

Mechanické zkoušky můžeme dělit například podle charakteru zatěžování (statické a dynamické), zjišťování vlastností nebo souboru vlastností (zkoušky pevnostních vlastností, tvrdosti, únavy), teploty a prostředí, dále podle druhu namáhání (ohyb, tlak a tah).

Dále se budeme zabývat pouze statickými mechanickými zkouškami. Tímto druhem zkoušek se hodnotí chování materiálu za působení stálých nebo pomalu spojitě měnících sil. Zkušební těleso se zatěhuje zpravidla jen jednou, a to až do porušení. Podle druhu namáhání můžeme tyto zkoušky rozdělit na zkoušku tahem, tlakem a ohybem, které jsou popsány níže.[27]

1.11.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem při pomalém zatěžování a za tzv. teploty okolí, která je zhruba 23 ± 2 °C, patří mezi základní a nejběžněji prováděné zkoušky mechanických vlastností u většiny konstrukčních materiálů, tedy i u plastů. Výsledek zkoušky tahem do lomu materiálu představuje základní mechanické vlastnosti.

Během zkoušky je kruhová nebo obdélníková tyč zatěžována konstantní silou, konstantní rychlost, až do lomu materiálu. V průběhu zkoušky je zaznamenávána velikost působícího zatížení na prodloužení tyče, tzv. pracovní diagram, ve kterém lze popsat mezní oblasti deformace a napětí.[28]

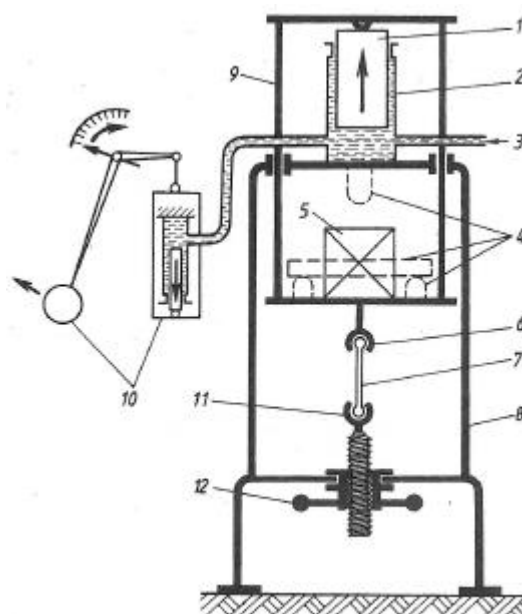
Vzorek se do čelistí upíná tak, aby jeho podélná osa byla shodná s osou zatěžování, Upínací systém musí v maximální míře zabraňovat vyklouzávání a nesmí způsobit předčasný lom zkušebních těles. Zkušební tělesa nesmí být znatelně napnuta před započítáním zkoušky. Po vyrovnání předpětí se nastaví a připevní na počáteční měřenou část průtahoměr nebo se přiloží měřidlo poměrného prodloužení. Pro optická měření se vyznačí na vzorku počáteční měřená délka. Zkušební těleso pro tahové zkoušky je zobrazeno na Obr. 13.



Obr. 13 Zkušební těleso pro tahové zkoušky

Zkušební stroj pro mechanické zkoušky tahem je buď jednoúčelový, nebo univerzální. U univerzálního stroje lze pomocí vhodných přípravků provádět různé druhy zkoušek. Například zkoušku tlakem, ohybem, krutem a další. Stroj musí odpovídat podmínkám ISO 5893. Součástí přístroje musí být siloměrný snímač, který udává celkovou tahovou sílu.[1]

Mechanismus musí být navržen tak, aby vylučoval vliv setrvačnosti a mohl pracovat s přesností, vyšší než je 1 % měřené hodnoty síly. Další součástí stroje je průtahoměr, který umožňuje stanovit relativní změny počáteční délky v průběhu celé zkoušky. Stejně jako u siloměrného snímače, musí průtahoměr vylučovat vliv setrvačnosti a pracovat s přesností vyšší než je 1% měřené hodnoty délky vzorku. Průtahoměr musí být připojen tak, aby nedošlo ke zdeformování, případně jinému poškození vzorku. Schéma zkušebního stroje je na Obr. 14.



Obr. 14 Schéma univerzálního zkušebního stroje, převzato z [1]

Nao obrázku výše je vyobrazen univerzální zkušební stroj pro všechny tři druhy zkoušek. Popis stroje: 1- píst, 2 – tlakový válec, 3 – tlakový olej, 4 – zkušební tyč a přípravky pro zkoušku v ohybu, 5 – zkušební těleso pro zkoušku v tlaku, 6 – horní upínací hlava, 7 – zkušební tyč pro zkoušku tahem, 8 – pevný rám, 9 – pohyblivý rám spojený s pístem, 10 – měřící zařízení, 11 – dolní upínací hlava a 12 – stavěcí zařízení.

Tahové veličiny

Tahové vlastnosti izolantů se určují podle normy ČSN ISO 527 „Plasty – Stanovení tahových vlastností.“.

Tloušťka

Značí se h a vyjadřuje menší počáteční rozměr pravoúhlého průřezu ve střední části zkušebního tělesa

Šířka

Značí se b a vyjadřuje větší počáteční rozměr pravoúhlého průřezu ve střední části zkušebního tělesa.

Průřez

Značí se A a vyjadřuje součin původní šířky a tloušťky zkušebního tělesa, $A = bh$

Mez pevnosti

Je definována jako σ_M a definujeme jí jako maximální napětí v tahu působící na zkušební těleso během zkoušky.

$$\sigma_M = \frac{F}{A} \quad (12)$$

kde F je příslušná naměřená hodnota síly a A je plocha počátečního řezu zkušebního tělesa.

Poměrné prodloužení

Značí se ε a vyjadřuje zvětšení délky vztažené na počáteční měřenou délku.

Poměrné prodloužení

Značí se ε a určí se z počáteční naměřené délky pomocí vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0} \quad (13)$$

kde l_0 je počáteční naměřená délka zkušebního tělesa a Δl_0 je zvětšení délky zkušebního tělesa.

Napětí při přetržení

Značí se σ_b a definováno je jako napětí, při kterém dochází k přetržení zkušebního vzorku.

Poměrné prodloužení při přetržení

Značí se ε_b a vyjadřuje poměrné prodloužení při posledním zaznamenaném bodu před

snížením napětí na hodnotu menší nebo rovnou 10% meze pevnosti, jestliže dojde k přetržení bez meze kluzu.

Poměrné prodloužení na mezi pevnosti

Značí se ε_m a vyjadřuje poměrné prodloužení, při kterém je dosaženo meze pevnosti.

Modul pružnosti v tahu

Značí se E_t a určí se ze dvou hodnot poměrného prodloužení pomocí vztahu:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \quad (14)$$

kde E_t je modul pružnosti v tahu, σ_1 je napětí naměřené při hodnotě $\varepsilon_1 = 0,0005$ (0,005%) a σ_2 napětí naměřené při hodnotě $\varepsilon_2 = 0,0025$ (0,25%).

Poissonův poměr

Značí se μ_n . Je poměrné zúžení ε_n v jednom ze dvou normálových rozměrů kolmých k ose protažení v počáteční pracovní části zkušební tělesa k odpovídajícímu poměrnému prodloužení ve směru protažení. Vyjádří se rovnicí:

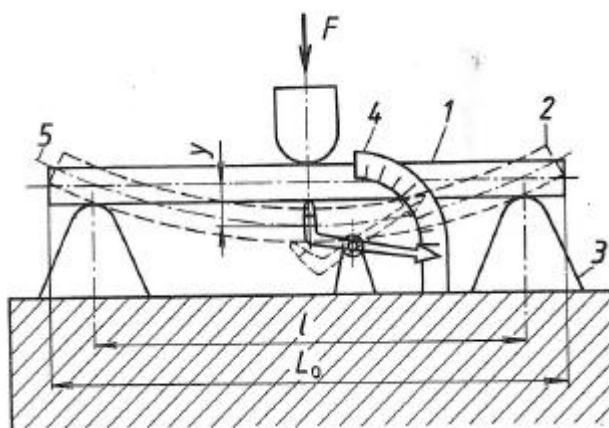
$$\mu_n = -\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon}, \quad (15)$$

kde ε je poměrné prodloužení, ε_n je deformace v normálovém směru a $n = b$ je šířka nebo $n = h$ je tloušťka materiálu.

1.11.2 Zkouška ohybem

Tato zkouška se ve většině případů používá u materiálů křehkých, protože u materiálů houževnatých k porušení zkušební tyče nedojde. Zkušební tyč je uložena na podpěrách a uprostřed tyče působí zatěžující síla. Při postupně rostoucím zatížení odměřujeme průhyb tyče až do okamžiku, kdy se tyč přelomí nebo se trvale prohne.[1]

Rychlost zatěžování se nastaví dle požadavků v předmětové normě zkoušeného materiálu. Není-li k dispozici, vybere se hodnota, která se co nejvíce blíží rychlosti deformace 1% za minutu. Je to rychlost, která během 1 minuty způsobí průhyb tělesa co nejbližší 0,4 násobku jeho tloušťky. Ukázka zkoušky ohybem je na Obr. 15.



Obr. 15 Zkouška Ohybem, převzato z [1]

Na obrázku výše je graficky znázorněna zkouška ohybem. Popis obrázku: 1 – zkušební tyč před ohybem, 2 – zkušební tyč po ohybu, 3 – podpěry, 4 – měřicí zařízení, 5 – neutrální osa, l – vzdálenost podpěr, L_0 – délka zkušební tyče, F – zatěžující síla a y – průhyb tyče.

Zkušební stroj používaný při zkoušce ohybem je obdobný stroji použitý při zkoušce tahem. Musí vyhovovat podmínkám ISO 5893 a musí být schopen vyvinout požadovanou rychlost zkoušení.

Zkušební těleso má tvar tyčinky. Rozměry vzorku musí být v souladu s příslušnou materiálovou normou, podle které se provádí mechanická zkouška ohybem. Zkušební těleso pro ohybovou zkoušku je na Obr. 16.[1]



Obr. 16 Zkušební těleso pro ohybovou zkoušku

Ohybové vlastnosti

Ohybové vlastnosti izolantů se stanovují podle příslušné normy ČSN ISO 178 Plasty – Stanovení ohybových vlastností.

Pevnost v ohybu

Značí se σ_{fM} . Je definováno jako maximální napětí v ohybu, které ještě vydrží zkoušený vzorek bez strukturálního poškození.

Definice ohybem na mezi pevnosti v ohybu

Značí se ε_{fM} . Je to deformace způsobená ohybem při maximálním napětí v ohybu.

Napětí v ohybu

Značí se σ_f . Lze vyjádřit vztahem:

$$\sigma_f = \frac{3.F.L}{2.b.h^2}, \quad (16)$$

kde F je použitá síla, L je rozpětí podpěr, b je šířka a h je tloušťka zkoušence.

Deformace ohybem

Značí se ε_f a je popsána jako:

$$\varepsilon_f = \frac{6.100.s.h}{L^2}, \quad (17)$$

kde s je průhyb materiálu, h je tloušťka zkoušeného vzorku a L je rozpětí podpěr.

Modul pružnosti v ohybu

Značí se E_f a je popsán vztahem:

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}, \quad (18)$$

kde hodnota σ_{f1} je rovna napětí v ohybu naměřené při průhybu s_1 a hodnota σ_{f2} je rovna napětí v ohybu naměřené při průhybu s_2 a ε_{f1} je odpovídající deformace ohybem při průhybu s_1 a ε_{f2} je odpovídající deformace ohybem při průhybu s_2 .

1.11.3 Zkouška tlakem

Při deformaci v tlaku nastává zkracování zkušební tělesa. U tuhých, tvrdých plastů napětí v tlaku stoupá do meze pevnosti, která je destrukční mezí. Překročí-li napětí mez pevnosti, dojde k roztříštění nebo pomalejšímu rozdrcení materiálu. Často dochází k výskytu trhlin na povrchu zkušební tělesa, aniž by došlo k velké deformaci a byla porušena celková soudržnost.

Při stlačování houževnatých a měkčích plastů se těleso deformuje, aniž by docházelo k jeho viditelné destrukci. Zkušební tělesa mají tvar hranolu, válce nebo trubky. V průběhu zkoušky se stanovuje síla (napětí) a odpovídající stlačení (poměrné stlačení) zkušební tělesa.

Zkouška pevnosti v tlaku se koná na zkušební kostce nebo válečku, položeném na desce pohyblivého rámu zkušebního stroje.[1]

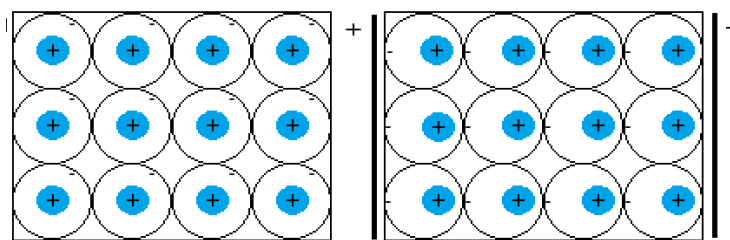
1.12 Dielektrikum a izolant

Pojmy dielektrikum a izolant bývají často zaměňovány, nebo jsou pokládány za ekvivalentní, to je chyba, neboť se jedná o skupiny materiálů, u kterých se mohou vlastnosti velmi lišit.

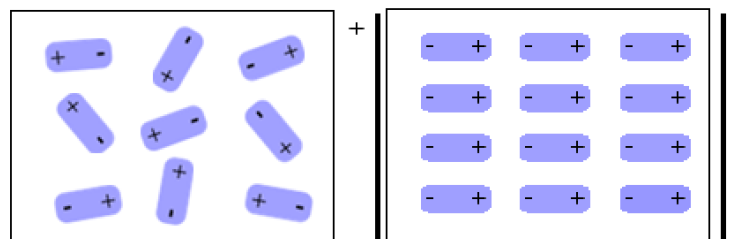
Fyzikální rozdíly mezi izolanty a dielektriky nejsou, existují pouze rozdíly v požadavcích na obě látky při elektrotechnickém užití. Mezi požadavky na izolanty můžeme zařadit vysoký měrný odpor, tedy rezistivitu, minimálně o hodnotě $10^8 \Omega\text{cm}$ a dále vysokou elektrickou pevnost, minimálně 10 kV/cm . Do požadavků mezi dielektrika můžeme zařadit vysokou permitivitu při co nejmenších dielektrických ztrátách a vysokou elektrickou pevnost.

Dielektrikum je látka, která má po vložení do elektrického pole schopnost tvorby a existence vlastního vnitřního elektrického pole. Je to tedy látka se schopností se v tomto vnějším elektrickém poli polarizovat. Polarizace vzniká při vložení do elektrického pole. Tato vlastnost (tvorba zmíněného vnitřního elektrického pole) dala těmto látkám název – předpona „di“ totiž značí směr dovnitř a dielektrikum potom chápeme jako „zelektřizované“ prostředí. Dielektrika se tak stávají aktivními prvky se specifickými vlastnostmi.

Polarizace je definována jako proces, při kterém dochází k narušení symetrie elektrických nábojů a následkem toho ke vzniku dipólů. Dielektrika můžeme rozdělit na dvě skupiny. První skupinou jsou tzv. nepolární dielektrika, u kterých se vyskytuje polarizace atomová. Při atomové polarizaci se z atomů nebo molekul působením přitažlivé a odpuzivé elektrické síly stanou elektrické dipóly. V takovém případě dojde k nesymetrickému rozložení částic s elektrickým nábojem uvnitř atomů nebo molekul. Druhou skupinou jsou polární dielektrika, u kterých dochází k polarizaci orientační. Jsou to látky, v jejichž molekulách jsou náboje uspořádány nesymetricky. Molekuly polárních dielektrik mají permanentní dipólový moment, jehož velikost je téměř nezávislá na intenzitě elektrického pole. Nejběžnější příklad polárních dielektrik je voda. Atomová a orientační polarizace jsou zobrazeny na obrázcích níže.



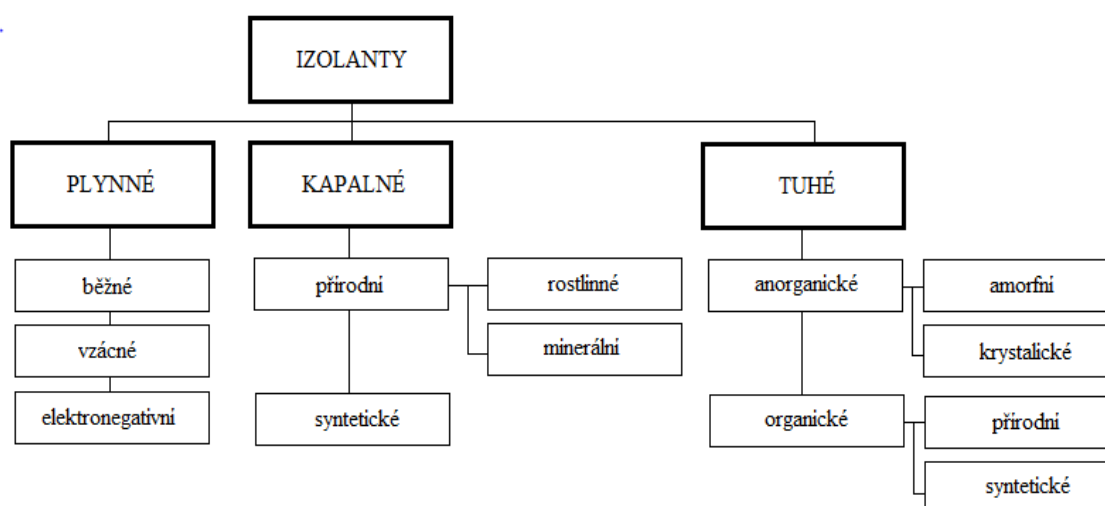
Obr. 17 Atomová polarizace



Obr. 18 Orientační polarizace

Izolant je naproti tomu materiál (pro daný účel průmyslové aplikace upravená látka) mající vlastnost zabránit průchodu proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem. Jedná se tedy o vzájemné odizolování těchto míst a izolanty jsou tak pasivními prvky bránícími průchodu proudu.[15]

Podle skupenství můžeme izolační materiály rozdělit na kapalné, plynné a pevné. V dalším dělení je možné izolační materiály rozdělit podle jejich původu. Vlastnosti izolačních materiálů jsou dány stavbou atomů a molekul. Schéma rozdělení izolačních materiálů je na Obr. 19.



Obr. 19 Schéma rozdělení elektroizolačních materiálů

1.12.1 Anorganické tuhé izolanty

Anorganické tuhé izolanty tvoří velmi důležitou skupinu izolačních materiálů, mezi hlavní výhody patří vysoká odolnost proti působení vyšších teplot, nehořlavost, ve většině případů malá hygroskopičnost, velmi dobré elektrické vlastnosti, dosti dobré mechanické vlastnosti, výborná odolnost proti působení elektrických výbojů a značná stabilita, to je neměnnost charakteristických vlastností v čase. Anorganické izolanty mají i své nevýhody, kam patří zejména malá mechanická pevnost při rázovém namáhání, lámavost a křehkost.[29]

Mezi nejznámější anorganické izolanty patří zejména azbest, slída, skla a keramika. Azbest se v elektrotechnice používá ve formě krátkých, velmi krátkých a dlouhých vláken,

ze kterých se vytváří příze, tkaniny, azbestový papír a lepenka. Jejich hlavní předností je nehořlavost. Slídové izolanty používané v elektrotechnice jsou muskovit a flogopit. Mezi jejich charakteristické vlastnosti patří štípatelnost, v tuhých lístcích ohebnost, pružnost, nehořlavost a chemická odolnost. Keramika představuje materiály na bázi jílových minerálů (především kaolinitu, illitu a montmorillonitu), živců, oxidů křemičitého, hlinitého, titaničitého, zirkoničitého, uhličitanů hořečnatého a vápenatého dále nitridů křemíku a boru, karbidu křemíků, grafitu a dalších.

Skla jsou materiály vyráběné především z oxidu křemičitého, uhličitanů vápenatého, sodného a draselného, oxidů olovnatého, barnatého, boraxu, halogenidů, chalkogenidů.[29]

1.12.2 Organické tuhé izolanty

Organické tuhé izolanty můžeme rozdělit na dvě skupiny. Organické syntetické látky a organické izolanty na bázi přírodních makromolekulárních látek. Organické syntetické látky představují většinou makromolekulární hmoty, které můžeme z hlediska jejich vlastností rozdělit na elastomery, termoplasty a reaktoplasty.

Mezi organické přírodní izolanty patří dřevo, celulóza, papír a lepenka. V dnešní době je většina těchto izolantů nahrazena plastovými materiály. V elektrotechnice byl dříve papír používán na výrobu kondenzátorů a kabelu. Přírodní vlákna pro opletování vinutí transformátorů. Dále se v elektrotechnice používaly izolační tkanice, trubičky a pásy.[29]

1.12.3 Kapalně izolanty

Kapalně izolanty dobře vyplňují daný prostor, odvádějí přebytečné teplo, usnadňují zhasnutí případného výboje a odlehčují zatížení pevných izolantů. Hlavními představiteli kapalných izolantů jsou rostlinné a minerální oleje a syntetické kapaliny.[30]

Rostlinné oleje používané v elektrotechnice jsou směsí esterů, glycerinů a nenasyčených mastných kyselin. Můžeme je rozdělit na vysychavé (lněný, dřevný) a na nevysychavé oleje (ricinový, řepkový). Ricinový olej se používá k napouštění papírových kondenzátorů pro stejnosměrné obvody. Vysychavé oleje se nejčastěji používají jako přísady do izolačních laků. Rostlinné oleje se spíše hodí pro nízkonapěťové zařízení. U zařízení vysokého napětí se rostlinné oleje používají jen málo a na krátkou dobu.

Nevýhodou rostlinných olejů je vázání velkého množství obsahu vody na molekulu látky. Takovéto velké množství vody se ve výrobním procesu, dá jen stěží snížit. Obsah je možné snížit na 100 ppm zahřátím na 100 °C a rozprášením ve vakuu.

Minerální oleje oproti rostlinným olejům jsou získávané destilací ropy. Ropa je tvořena směsí kapalných, tuhých a plynných látek. Základní dva druhy minerálních olejů, které se získávají z ropy, jsou parafinické a naftenické. Parafinické oleje jsou nasycené uhlovodíky s rozvětvenými (izoalkany, izoparafiny) a nerozvětvenými (n-alkany, parafiny) řetězci s obecným vzorcem C_nH_{2n+2} (např. n-hexan C_6H_{14}). Jsou chemicky stálé, s vysokým bodem vzplanutí, dobrou viskozitní křivkou, obvykle však tuhnoucí při teplotách blízkých nule.

Naftenické oleje jsou cyklické nasycené uhlovodíky s obecným vzorcem C_nH_{2n}

(např. cyklohexan C_6H_{12}). Jsou chemicky méně stálé než parafíny, ale s nízkým bodem tuhnutí.

Syntetické oleje můžeme rozdělit podle svého vzniku na kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků (polybutyleny) a dále na nepolární, ekologicky nezávadné látky vykazující odolnost proti oxidaci a záření. Vyznačují se dobrými elektroizolačními vlastnostmi a stabilitou i při vyšších teplotách. Nejčastěji se používají jako kabelové oleje a k impregnaci svitkových kondenzátorů.[30]

1.12.4 Plynné izolanty

Plynné izolanty mají malou vzdálenost mezi jejich molekulami, proto mají obecně plyny malou hustotu. Malá hustota plynu je ovšem příčinou poměrně malé elektrické pevnosti v porovnání s kapalnými a pevnými izolanty. Na rozdíl od kapalných a tuhých izolantů se plynné izolanty po průrazu obnovují. Elektrická pevnost závisí především na vzdálenosti elektrod, teplotě a na tlaku. Stoupá při vysokých a nízkých tlacích.

Plynné izolanty jsou charakteristické značnou stlačitelností, popřípadě rozpínavostí způsobující rovnoměrně vyplnění objemu, který zaujímají. Obecně se dá říci, že všechny plyny mají velký součinitel objemové roztažnosti.

1.13 Veličiny a vlastnosti dielektrika

Z elektrického hlediska můžeme popsat stavy dielektrika několika základními veličinami, které jsou ukazateli stavu materiálu v daném časovém okamžiku. Mezi základní veličiny, které popisují chování dielektrik v elektrickém poli při dané teplotě a kmitočtu patří zejména relativní permitivita, vnitřní rezistivita, povrchová rezistivita, ztrátový činitel a elektrická pevnost.

Komplexní permitivita

Komplexní permitivita je pojem, který se používá k popsání polarizačních jevů. Je-li dielektrikum vystaveno působení vnějšího elektrického pole o konstantní intenzitě E , dochází ke zvýšení elektrické indukce D vlivem polarizačních jevů. K navýšení elektrické indukce dojde o hodnotu vektoru P oproti elektrické indukci ve vakuu D_0 .

$$\vec{D} = \vec{D}_0 + \vec{P} \quad (19)$$

Komplexní permitivita je frekvenčně závislá a charakterizuje vlastnosti dielektrik ve střídavém elektrickém poli. Lze ji popsat rovnicí:

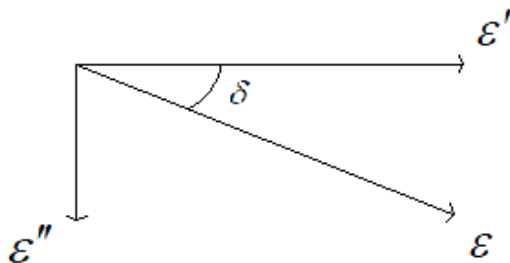
$$\varepsilon(j\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega) \quad (20)$$

kde ε' je reálná složka komplexní permitivity a vyjadřuje vlastní relativní permitivitu a ε'' je imaginární část, která vyjadřuje ztráty dielektrika po vložení do elektrického střídavého pole. Grafické znázornění komplexní permitivity je na Obr. 20.[15]

Z následujícího obrázku můžeme odvodit vztah pro určení velikosti úhlu, který udává zpoždění vektoru elektrické indukce za vektorem intenzity elektrického pole.

Velikost úhlu se určí následujícím vztahem:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (21)$$



Obr. 20 Grafické znázornění komplexní permitivity

Relativní permitivita

Dielektrikum lze charakterizovat veličinou ε_r nebo ε' zvanou relativní permitivita. Ta udává, kolikrát vzroste kapacita kondenzátoru, vyplníme-li prostor mezi jeho elektrodami zkoumaným materiálem. Relativní permitivita se vypočítá pomocí tohoto vzorce:

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0}, \quad (22)$$

kde C_x je kapacita kondenzátoru, v němž je prostor mezi elektrodami a kolem nich zcela vyplněn izolantem a C_0 je kapacita elektrod stejně uspořádaných a umístěných ve vakuu.[15]

Výhoda relativní permitivity oproti polarizovatelnosti spočívá v její měřitelnosti. Můžeme ji zapsat vztahem:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \cdot (1 + k) \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} \quad (23)$$

kde D je elektrická indukce, E je intenzita elektrického pole, k je dielektrická susceptibilita, ε_r je relativní permitivita.

Vnitřní odpor

Je poměr stejnosměrného napětí připojeného mezi dvě elektrody, které jsou umístěny na dvou protilehlých stranách zkušební tělesa a ustáleného proudu mezi elektrodami, vyjímaje proud po povrchu zkušební tělesa se zanedbáním polarizačních jevů v oblasti elektrod.

Povrchový odpor

Je poměr stejnosměrného napětí připojeného mezi elektrodami na povrchu zkušební vzorku a proudu mezi elektrodami v daném čase přiložení napětí při zanedbání polarizačních jevů v oblasti elektrod. Měříme tekoucí po povrchu tělesa, který je ovlivňován absorbovanou vlhkostí a příměsemi včetně nečistoty a zahrnuje i složku

tekoucí vnitřkem tělesa.

Rezistivita

Rezistivita (též měrný elektrický odpor nebo také specifický elektrický odpor) je fyzikální veličina, vyjadřující elektrický odpor vodiče jednotkové délky (1 m) jednotkového obsahu průřezu (1 m²). Rezistivita je materiálová konstanta, charakterizuje elektrickou vodivost látky. Čím větší je rezistivita, tím menší je vodivost dané látky. Čím větší je rezistivita, tím větší je elektrický odpor.

Vnitřní a povrchová rezistivita

Obě veličiny se stanovují zpravidla v tříelektrodovém systému, který je tvořen měřicí, napěťovou a ochrannou elektrodou.

Vnitřní rezistivita je rovna poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty uvnitř izolantu. Číselně se rovná vnitřnímu odporu krychle ze zkoušeného materiálu o hraně 1 m, měřenému mezi dvěma elektrodami, přiloženými na protilehlých stěnách. Vnitřní rezistivita se vypočítá podle vztahu:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h}, \quad (24)$$

Kde ρ_v je vnitřní rezistivita, R_v je vnitřní odpor, S je efektivní plocha měrné elektrody a h je průměrná tloušťka zkušebního tělesa.

Povrchová rezistivita materiálu se rovná poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty na povrchu izolantu. Číselně se rovná odporu čtverce povrchu zkoušeného materiálu o straně 1 m, měřenému mezi dvěma elektrodami přiloženými na protilehlých stranách. Povrchová rezistivita se vypočítá podle vztahu:

$$\rho_p = R_p \frac{O}{d}, \quad (25)$$

Kde ρ_p je povrchová rezistivita, R_p je povrchový odpor, O je efektivní obvod ochranné elektrody pro elektrodové uspořádání a d je vzdálenost mezi elektrodami.

Ideální dielektrikum neobsahuje žádné volné nosiče náboje, nemělo by u něj dojít k elektrickému průrazu díky nekonečné hodnotě elektrické pevnosti a vnitřní rezistivity. Tento ideální stav je ale nedosažitelný.

Ztrátový činitel

Ztrátovým činitelem $\tan \delta$ se hodnotí převážně dielektrické ztráty. Jedná se o tangentu ztrátového úhlu, který doplňuje fázový úhel mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole do 90 stupňů. Ztrátový činitel je bezrozměrná veličina a zahrnuje ztráty vyvolané polarizací dielektrika. Matematicky se určuje vyhodnocením prvků C a R sériového nebo paralelního náhradního zapojení dielektrik.

Výpočet při paralelním zapojení:

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p}, \quad (26)$$

Kde C_p je kapacita v paralelním náhradním zapojení a R_p je odpor v paralelním náhradním zapojení.

Výpočet při sériovém zapojení:

$$tg\delta = \omega C_s R_s, \quad (27)$$

kde C_s je kapacita v sériovém náhradním zapojení a R_s je odpor v sériovém náhradním zapojení.

Elektrická pevnost

Elektrická pevnost se značí E_p . Vyjadřuje napětí způsobující průraz izolace vztažené na tloušťku dielektrika. Udává velikost průrazného napětí U_p lineárně přepočítaného na tloušťku dielektrika d . Je to jedna z nejdůležitějších sledovaných vlastností při návrhu izolačního systému elektrického stroje. Elektrická pevnost má rozdílný charakter v látkách plynných, kapalných a pevných.

V pevných izolantech je na rozdíl od kapalin a plynů ztráta izolačních schopností po průrazu trvalá, neboť dojde k vytvoření vodivé cesty mezi elektrodami. Elektrická pevnost se vypočítá podle vztahu:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (28)$$

kde E_p je elektrická pevnost, U_p je průrazné napětí a d je tloušťka dielektrika.[15]

Elektrická pevnost materiálů závisí také na druhu a délce působení přiloženého elektrického pole. Přiložené elektrické pole může mít více podob, zejména se jedná o tzv. střídavé, impulsní a stejnosměrné pole. Při hodnocení střídavé elektrické pevnosti provádíme měření převážně při frekvenci zkušebního napětí 50 Hz. Impulsní elektrickou pevnost zkoumáme přiložením rázového napětí o tvaru rázové vlny 1,2/50. Tedy doba čela vlny 1,2 s a 50 s, je doba do poklesu napětí na poloviční hodnotu. Stejnosměrná elektrická pevnost bývá obvykle větší než střídavá, někdy až dvojnásobná.

Z hlediska průběhu a charakteru dějů a mechanismů probíhajících v pevných látkách při elektrickém namáhání končících jejich průrazem obecně můžeme rozlišit tři způsoby průrazu pevných izolantů:

Čistě elektrický průraz

Při čistě elektrickém průrazu velikost průrazného napětí prakticky nezávisí na teplotě ani na délce působení přiloženého napětí. Energie elektrického pole je okamžitě tak velká, že způsobí okamžitou destrukci v nejslabším místě namáhaného objektu. Je ovlivňována homogenitou elektrického pole, chemickým složením a strukturou daného izolantu. K tomuto druhu průrazu dochází v tom případě, kdy je vyloučen ohřev izolantu a tím i procesy stárnutí způsobené vlivem teploty a elektrického pole.[15]

Tepelný průraz

Je charakteristický tím, že se vyznačuje výraznou závislostí průrazného napětí na teplotě a délce působení přiloženého napětí. U toho druhu průrazu nemá takový vliv stupeň homogenity elektrického pole nebo nehomogenita vlastního izolantu. Tepelný průraz vzniká v důsledku přehřátí izolantu způsobeného Jouleovými nebo

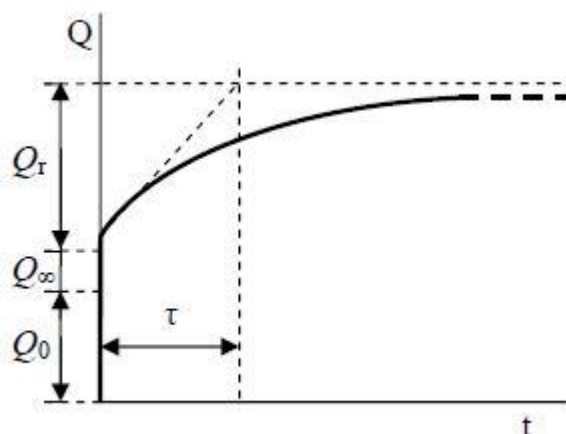
dielektrickými ztrátami eventuálně kombinací obou.

Elektrochemický průraz

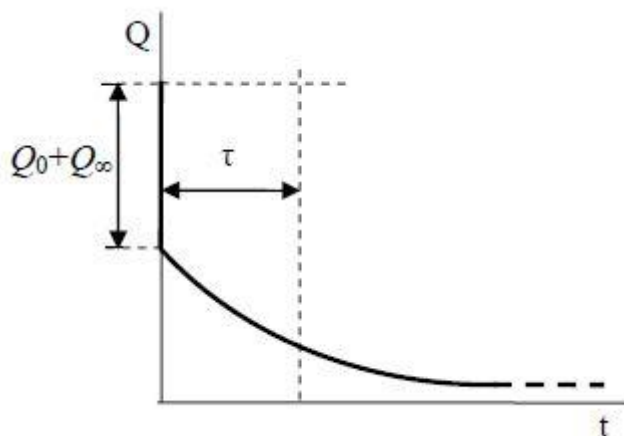
Vyskytuje se v případech, kdy na izolant působí elektrické pole po dlouho dobu. V izolantu jsou pak nastartovány elektrochemické procesy, které postupně zhoršují jeho vlastnosti a v konečném důsledku pak výrazně snižují jeho elektrickou pevnost. Tento druh průrazu se někdy nepovažuje za samostatný, protože vlastní mechanismus průrazu postupně měněného izolantu se nejčastěji realizuje formou tepelného průrazu.[15]

1.13.1 Dielektrická absorpce

Dielektrická absorpce představuje nestacionární proces, projevující se postupným nabíjením kondenzátoru s reálným (technickým) dielektrikem po jeho připojení na zdroj stejnosměrného napětí. Příčinou absorpce je dielektrická relaxace, která vzniká v důsledku pomalých (relaxačních) polarizací. Obdobný proces probíhá při odpojení. Nabíjení kondenzátoru můžeme rozdělit do třech fází. V první fázi okamžitě přiteče náboj Q_0 , který odpovídá geometrické kapacitě. Ve druhé fázi v době $10^{-16} - 10^{-12}$ s přiteče náboj Q jako důsledek rychlých polarizací. Ve třetí fázi pomalu přitéká absorpční náboj Q v důsledku pomalých (relaxačních) polarizací.[31]



Obr. 21 Časový průběh náboje při nabíjení kondenzátoru, převzato z [29]



Obr. 22 Časový průběh náboje při vybíjení kondenzátoru, převzato z [29]

Při nabíjení kondenzátoru protéká izolantem proud $i(t) = i_a(t) + i_v$. $I_a(t)$ je absorpční proud a i_v je vodivostní proud, který odpovídá stejnosměrné vnitřní elektrické vodivosti.[31]

Velmi využívány pro svoji dobrou vypověditelnost jsou polarizační indexy, které představují další parametry získávané z absorpčních charakteristik. Polarizační indexy využívají pro popis stavu materiálu časovou proměnnost absorpčního proudu. Jsou to bezrozměrné čísla. Indexy dělíme na jednodominutový polarizační index p_{i1} a na desetiminutový polarizační index p_{i10} . [21]

Jednodominutový polarizační index p_{i1} je definován jako poměr absorpčních proudů v patnácté a šedesáté sekundě po přiložení napětí na vzorek. Vypočítá se pomocí této rovnice:

$$p_{i1} = \frac{i_{(15)}}{i_{(60)}} = \frac{R_{(60)}}{R_{(15)}}, \quad (29)$$

kde R_{15} , R_{60} jsou odpory v 60 a 15 sekundě od přiložení napětí a $i_{(15)}$, $i_{(60)}$ jsou odpovídající absorpční proudy. Dobíjecí proud $i(t)$ je nepřímo úměrný izolačnímu odporu $R(t)$, proto je možné použít v rovnici pro výpočet indexů hodnot izolačních odporů změřených stejnosměrným napětím.

Desetiminutový polarizační index p_{i10} se počítá z proudů v první a desáté minutě. Tento polarizační index používáme především v diagnostice izolačních systémů elektrických strojů a vypočítá se pomocí rovnice:

$$p_{i10} = \frac{i_{(60)}}{i_{(600)}} = \frac{R_{(600)}}{R_{(60)}}, \quad (30)$$

kde $i_{(60)}$ je absorpční proud v 60 sekundě měření, $i_{(600)}$ je absorpční proud v desáté minutě měření, $R_{(600)}$ je odpor naměřený v desáté minutě měření a $R_{(60)}$ odpor naměřený v 60 s měření.

1.13.2 Stárnutí elektroizolačních materiálů

Stárnutí je definováno jako nevratné změny vlastností elektroizolačního materiálu na základě působení jednoho nebo více faktorů. Stárnutí představuje nevratnou změnu (degradaci) v závislosti na čase. Stav elektroizolačního materiálu je ovlivňován různými činiteli. Během provozu zařízení mohou na izolační systém působit různé druhy namáhání. Jde například o elektrické, tepelné, chemické a mechanické namáhání. Všechny výše uvedené druhy namáhání představují největší původce deformačních materiálů.[32]

Nadále se budu zabývat pouze modelem tepelného stárnutí, jelikož vzorky epoxidové pryskyřice jsou vystaveny tepelnému stárnutí.

Model tepelného stárnutí

Odolnost elektrických zařízení závisí na tepelné odolnosti izolačního systému, který většinou tvoří nejslabší článek celého zařízení. Zařadit zařízení do určité třídy tepelné

odolnosti můžeme pouze podle výsledků zkoušek zrychleného stárnutí. Souvislost mezi délkou experimentu, tj. životností izolace τ_T (h) a teplotou T (K), při které izolace stárne, vychází z pravidla Montsingerova:

$$\tau_T = A \cdot e^{-BT}, \quad (31)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty, které se musejí určit experimentálně. Dobu života můžeme také určit z Arrheniovy rovnice:

$$\tau_T = a \cdot e^{\frac{W_a}{RT}}, \quad (32)$$

kde W_a je aktivační energie, R je univerzální plynová konstanta, a je konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul a T je absolutní teplota.[32]

1.14 Měřicí metody

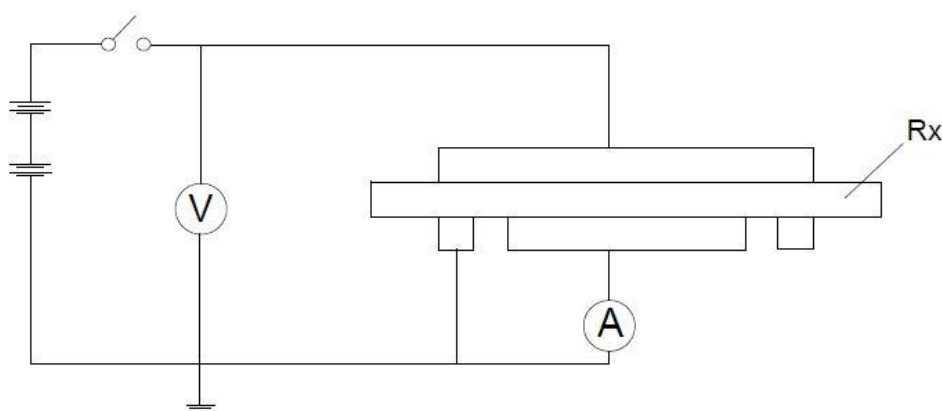
Metody používané pro měření odporu můžeme rozdělit na přímé a porovnávací:

- Přímé – jsou založeny na současném měření stejnosměrného napětí připojeného na neznámý odpor a proudu, který tímto odporem protéká (voltampérová metoda).
- Porovnávací – určují poměr neznámého odporu a známého odporníku v můstkovém zapojení nebo porovnávají proudy tekoucí přes odpory při konstantním napětí.

1.14.1 Měření elektrického odporu

Voltampérová metoda

Patří mezi metody přímé. Tato metoda je doporučena pro měření vnitřního a povrchového odporu. Je to nejjednodušší metoda přímého čtení procházejícího proudu. Schéma zapojení je znázorněno na Obr. 23.



Obr. 23 Voltampérová metoda měření izolantů

Použité napětí se měří stejnosměrným voltmetrem. Proud měříme odpovídajícím přístrojem na měření proudu. Neznámý odpor R_x se vypočítá:

$$R_x = \frac{U}{I_x}, \quad (33)$$

kde U je připojené napětí a I_x je proud protékající vzorkem.[21]

Další možností měření elektrického odporu je za využití můstkové metody. Někdy je tato metoda označována jako metoda Wheatstonova můstku, která vychází ze známého srovnání neznámého odporu se známým odporem velké hodnoty. Tato metoda je popsána v literatuře č. [15].

1.14.2 Měření elektrické pevnosti

Při měření elektrické pevnosti záleží u většiny izolantů na intenzitě a délce přiloženého napětí a také na délce trvání výbojů před průrazem. Obecně se dá říct, že elektrická pevnost klesá s tloušťkou izolantu mezi elektrodami a s dobou působení napětí. I materiály, které mají vysokou elektrickou pevnost, časem neodolávají degradačním procesům.

Pokud se jedná o hodnoty nízké elektrické pevnosti, potom zkoušky provádíme na vzduchu. Většinou se ovšem zkoušky provádí v transformátorovém oleji pro zabránění přeskoků. Pokud jsou materiály vystaveny vysoké teplotě, tak se zkoušky provádí buď na vzduchu ve vhodné sušce s cirkulací vzduchu, nebo v kontejneru s transformátorovým olejem v sušce. Můžeme také použít kapalinový termostat, kde kapalina přenáší teplo.

Existuje celá řada zkoušek elektrické pevnosti. Provádí se zkoušky stejnosměrným napětím, zkoušky rázovým napětím, zkoušky střídavým napětím a krátkodobé zkoušky s rychlým nárůstem napětí.[21]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části jsem se věnoval především proměření elektrických a mechanických vlastností připravených vzorků elektroizolačních hmot. Níže jsou uvedeny všechny výsledky měření, grafy, tabulky a výpočty.

2.1 Popis pracoviště a použitých přístrojů

Měření elektrických vlastností epoxidových izolačních hmot bylo realizováno ve školních laboratořích. Měření mechanických vlastností bylo realizováno ve specializované laboratoři v rámci Strojní fakulty VUT v Brně. Podrobný popis použitých přístrojů používaných pro měření vlastností hmot uvádím níže.

2.1.1 Měřicí systémy

Pro zjištění nabíjecího a vybíjecího proudu jsem použil měřicí přístroj 4339B High-Resistance Meter od společnosti Agilent Technologies. Měřicí přístroj je pro ukázkou zobrazen na Obr. 24.



Obr. 24 Měřicí přístroj 4339B

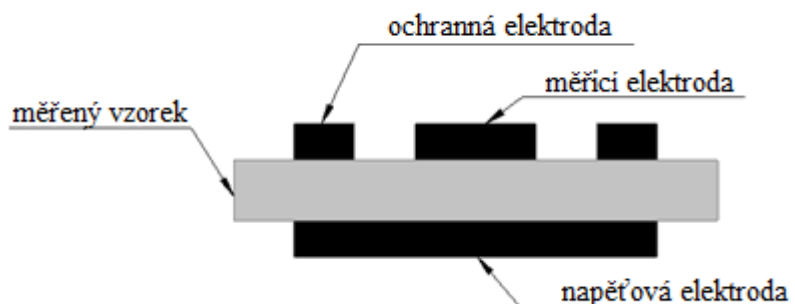
Tento měřicí přístroj byl během měření připojen k třielektrodovému měřicímu systému 16008B Resistivity Cell. Třielektrodový systém obsahuje měřící, napět'ovou a ochranou elektrodu a slouží pro umístění měřeného vzorku.

Celý takto zapojený systém je připojen pomocí kabelu do brány LAN, která slouží pro připojení k počítačové síti. Komunikace s počítačem probíhá pomocí UTP kabelu. V PC se nachází ovládací software, jedná se konkrétně o program VEE Pro od Společnosti Agilent Technologies. V tomto softwaru je možné programovat nastavení měření a určit výstup do programu Microsoft Office Excel. Výsledkem měření je Excelovský soubor obsahující naměřené charakteristiky vybíjecího a nabíjecího proudu. Kompletní měřicí systém je znázorněn na Obr. 25.



Obr. 25 Měřicí přístroj s elektrodovým systémem

Obecně se dá říci, že k měření vnitřního odporu se používá zpravidla tříelektrodový systém, ve kterém je přesně definovaný průměr měřicí elektrody. Je to přesně stanovená řada elektrod s předepsaným průměrem podle normy. Při měření vnitřního odporu je napětí připojeno na napěťovou elektrodu a měří se proud, který prochází vzorkem k měřicí elektrodě. Cela sestava ještě obsahuje ochrannou elektrodu, která je připojena k zemi, tedy je uzemněná. Elektrodové zapojení se vzorkem je uvedeno na Obr. 26.



Obr. 26 Schéma tříelektrodového systému

Pro měření kapacity a ztrátového činitele byl použit měřicí přístroj E4980A Precision LCR Meter, 20 Hz – 2 MHz. Příslušný měřicí přístroj je pro ukázkou zobrazen na Obr. 27.



Obr. 27 Agilent E4980A Precision LCR Meter

K měřicímu systému je během měření připojen další tříelektrodový systém Agilent 16451B Dielektric Test Fixture, do kterého se umístí zkoumaný vzorek. Takto zapojený systém je opět propojený s počítačem, kde je nainstalovaný software VEE Pro, který slouží pro nastavení a ovládání celého měření. Výstup z příslušného programu je opět do Microsoft Office Excel v podobě Excelovského souboru s naměřenými daty kapacit a ztrátového činitele. Celý kompletně zapojený systém je na obrázku.

2.1.2 Sterilizační komora

Pro tepelné stárnutí vzorků elektroizolačních hmot byla použita sterilizační komora Stericell společnosti BMT Medical Technology s. r. o. Objem této komory je 55 l, hloubka je 390 mm, šířka je 400 mm a výška je 350 mm. Uvedené rozměry se týkají vnitřních prostor komory. Pracovní teplota komory je od 10 °C nad okolní teplotu do maximální teploty uvedené výrobcem, a to 250 °C.

Komora je programovatelná, má tři druhy pevně nastavených sterilizačních programů. Je možné na komoře také nastavit celkový čas a požadovanou teplotu. Vzorky jsou v komoře umístěny na železných roštích, kde jsou volně rozprostřeny. Sterilizační komora je na Obr. 28.



Obr. 28 Sterilizační komora

2.1.3 Zkušební stroj pro měření mechanických vlastností

Zkoušky mechanických vlastností byly realizovány na zkušební stroji Zwick Z250 ALLround-Line tCII. Je to velmi moderní elektromechanický zkušební stroj se silovou kapacitou 250 kN. Stroj je také vybaven dynamometrem pro zátěžné síly 50 kN, univerzálním extenzometrem se snímači deformace pro všechny typy zkoušek a teplotní komorou v rozsahu teplot (-80 až 250) °C. Zkušební stroj je na Obr. 29.



Obr. 29 Zkušební stroj pro mechanické zkoušky

2.1.4 Software pro měření mechanických vlastností

Pro řízení zkušebního stroje i pro základní vyhodnocení experimentálních dat byl použit software testXper II (Zwick). V průběhu zkoušek byla zaznamenávána všechna data, tj. časové průběhy síly, údajů ze snímačů podélného prodloužení a příčného zúžení, snímače průhybu, posuvu příčnicku stroje apod.

2.2 Vzorky pro měření elektrických vlastností

Zkoumané vzorky použité pro experimentální část byly zvoleny elektroizolační zalévací hmoty na bázi epoxidových pryskyřic. Tyto hmoty se používají především při výrobě transformátorů, senzorů a dalších vysokonapěťových produktů. V elektrotechnické výrobě plní funkci elektroizolačních materiálů a slouží jako ochrana před mechanickým, chemickým a jiným druhem namáhání. Velmi dobře také odvádí ztrátové teplo a mají dobré elektrické a mechanické vlastnosti. Jedná se vlastně o polymerní kompozitní materiál, který se skládá z několika složek, kde hlavní složku představuje již zmiňovaná epoxidová pryskyřice. Rozměry vzorků jsou 10 x 10 cm o tloušťce do 2 mm připravovány tlakovou metodou APG.

Tloušťka vzorků byla měřena pomocí Electronic Deep Throat mikrometru na 10 místech u každého vzorku. Následně z těchto naměřených hodnot byla vypočtena průměrná hodnota, se kterou se počítá ve výpočtech dielektrických vlastností měřených vzorků.

2.3 Vzorky pro měření mechanických vlastností

Pro zkoušku tahem byly připraveny zkušební tyče. Jednalo se o ploché zkušební tyče s průřezem (4 x 10) mm a délkou 50 mm. Hrany zkušebních tyčí byly upraveny broušením z důvodu zamezení vzniku předčasných lomů.

Vzorky pro ohybové zkoušky jsou tělesa s průřezem (10 x 15) mm a délkou, která umožňovala použít vzdálenost podpor na zkušebním stroji 110 mm.

Vzorky pro tlakové zkoušky byly připraveny rozřezáním těles, určených pro ohybové zkoušky. Takovýmto způsobem byly připraveny dva druhy těles. Tělesa pro určení pevnostních charakteristik v tlaku s rozměry (10 x 15 x 25) mm a dále tělesa pro měření modulu pružnosti v tlaku s rozměry (10 x 15 x 50) mm.

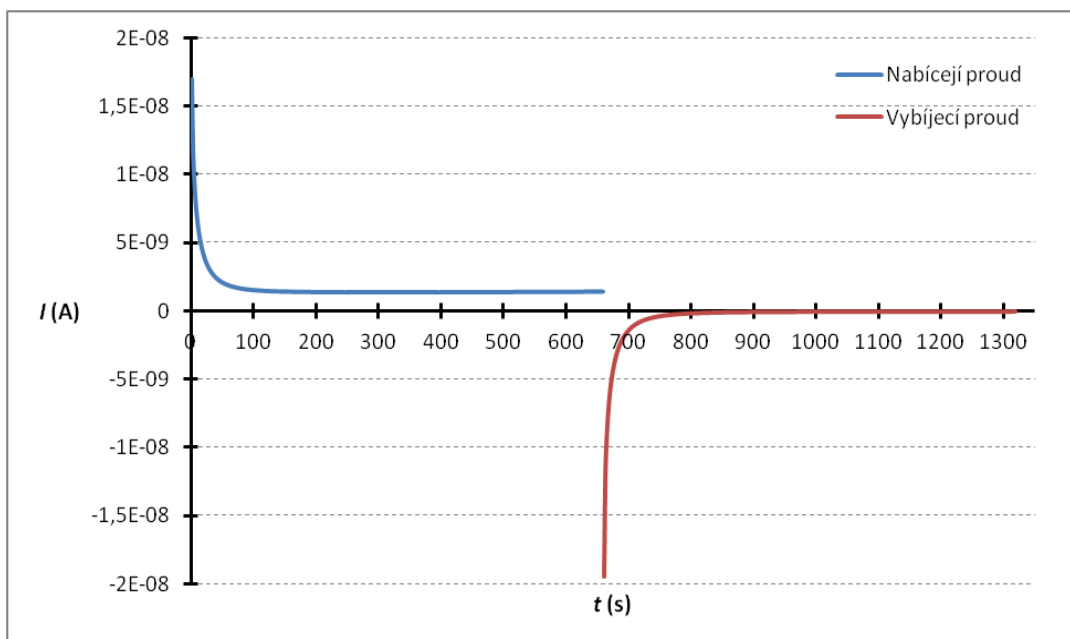
2.4 Vyhodnocení naměřených hodnot

Všechny naměřené data byly zaznamenány do tabulek a následně z nich byly vytvořeny grafické závislosti.

2.4.1 Porovnání nabíjecího a vybíjecího proudu

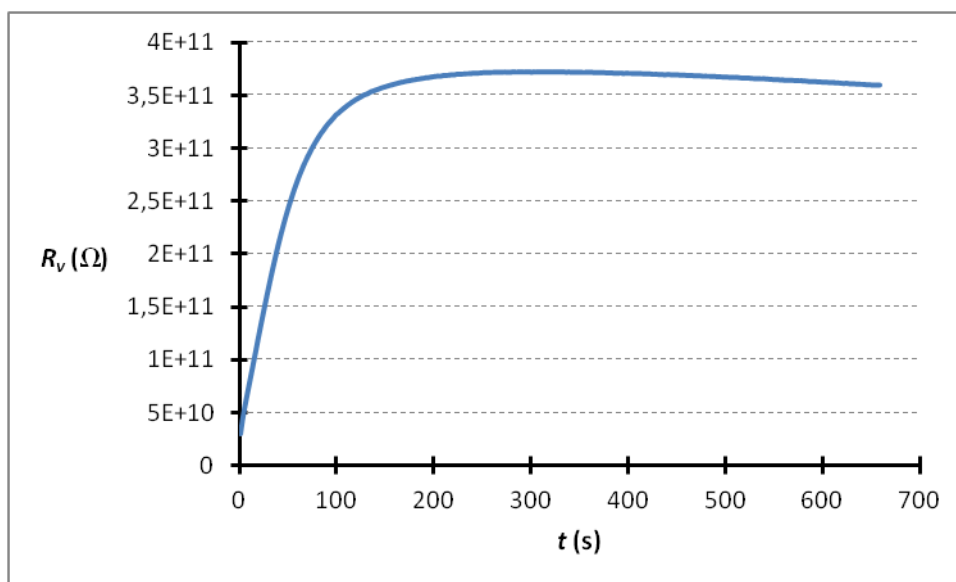
Na Obr. 30 můžeme pozorovat naměřené charakteristiky nabíjecího a vybíjecího proudu přesně tak, jak procházeli měřeným vzorkem. Časový interval byl nastaven na 600 s, jak pro nabíjení, tak i vybíjení. Tyto charakteristiky vytvořil simulační program od společnosti Agilent Technologies. Na obrázku je patrné, že závislost křivky nabíjecího proudu je modrá a závislost křivky vybíjecího proudu je červená. Proudů jsou si svým průběhem velmi podobné, mění se však v části konce nabíjení a začátku vybíjení. Je to při dosažení intervalu 600 s.

Zajímavá je maximální hodnota vybíjecího proudu, která je větší, je to způsobeno tím, že program počítá se stoprocentní účinností kondenzátoru při přechodu od vybíjecího cyklu, což není možné. Nezahrnuje totiž jevy, které nastávají uvnitř dielektrika při takovémto přechodu.



Obr. 30 Naměřené nabíjecí a vybíjecí proudy

V níže uvedeném grafu můžeme pozorovat průběh vnitřního odporu na čase během měření. Ze závislosti je patrné, že hodnota vnitřního odporu je vysoká, proto má daný materiál dobré izolační vlastnosti. Dielektrické materiály v dobré stavu (suché, nepoškozené) vykazují mnohem menší hodnotu vodivostního proudu, než je převládající absorpční proud.



Obr. 31 Závislost vnitřního odporu na čase

2.4.2 Výpočet polarizačních indexů

Při výpočtu jednodinutového polarizačního indexu se nejprve zjistí hodnoty nabíjecích proudů v patnácté a šedesáté sekundě měření. Takto naměřené hodnoty se dosadí do

následujícího vzorce

$$p_{i1} = \frac{i_{(15)}}{i_{(60)}} \quad (34)$$

Pro ukázkou výpočtu jednominutového a desetiminutového polarizačního indexu jsem použil vzorky s označením 1 až 5 hmoty SYNPO, které byly měřeny při teplotě 23 ± 2 °C.

Příklad výpočtu jednominutového polarizačního indexu SYNPO hmota pro vzorek číslo 1:

$$p_{i1} = \frac{i_{(15)}}{i_{(60)}} = \frac{5,966^{-11}}{1,594^{-11}} = 3,74, \quad (35)$$

kde $i_{(15)}$ je proud naměřený v 15 sekundách a $i_{(60)}$ je proud naměřený v 60 sekundách během měření.

Příklad výpočtu desetiminutového polarizačního indexu SYNPO hmota pro vzorek číslo 1:

$$p_{i10} = \frac{i_{(60)}}{i_{(600)}} = \frac{1,594^{-11}}{2,25^{-12}} = 7,08, \quad (36)$$

kde $i_{(60)}$ je proud naměřený v 60 sekundách a $i_{(600)}$ je proud naměřený v 600 sekundách během měření. Vypočítané a naměřené hodnoty pro SYNPO hmotu jsou v Tab. 2. Vypočítané hodnoty polarizačních indexů ostatních hmot při jiných teplotách jsou uvedeny v příloze 2.

Tab. 2 Hodnoty polarizačních indexů, SYNPO hmota při 23 ± 2 °C

Vzorek	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	p_{i1} [-]	p_{i10} [-]
1	14,8	5,966E-11	60	1,594E-11	600	2,251E-12	3,7	7,1
2	14,8	3,402E-11	60	1,194E-11	600	2,081E-12	2,9	5,7
3	14,8	5,768E-11	60	1,518E-11	600	2,115E-12	3,8	7,2
4	14,8	5,903E-11	60	1,541E-11	600	2,186E-12	3,8	7,1
5	14,8	5,715E-11	60	1,605E-11	600	2,501E-12	3,6	6,4

2.4.3 Výpočet rezistivity

Při měření jsem nejprve spočítal pomocí změřeného proudu v šedesáté vteřině měření a z přiložené hodnoty napětí vnitřní odpor. Hodnota napětí byla nastavena na 500 V. Níže je uveden příklad výpočtu vnitřního odporu pro vzorek číslo 1, SYNPO hmota.

$$R_v = \frac{U}{I_{nab}} = \frac{500}{1,594^{-11}} = 3,14 \cdot 10^{13} \Omega, \quad (37)$$

kde R_v je vnitřní odpor, U je přiložené napětí a I_{nab} je nabíjecí proud.

Příklad výpočtu vnitřní rezistivity pro vzorek č. 1:

$$\rho_v = R_v \frac{\frac{\pi(d_1+g)^2}{4}}{h} = 3,14 \cdot 10^{13} \frac{\frac{\pi(0,05+0,01)^2}{4}}{1,976 \cdot 10^{-3}} = 4,49 \cdot 10^{13} \Omega m, \quad (38)$$

kde ρ_v je vnitřní rezistivita, d_1 je průměr měřicí elektrody, g je vzdálenost mezi elektrodami a h je tloušťka vzorku.

Příklad výpočtu povrchové rezistivity pro vzorek č. 1:

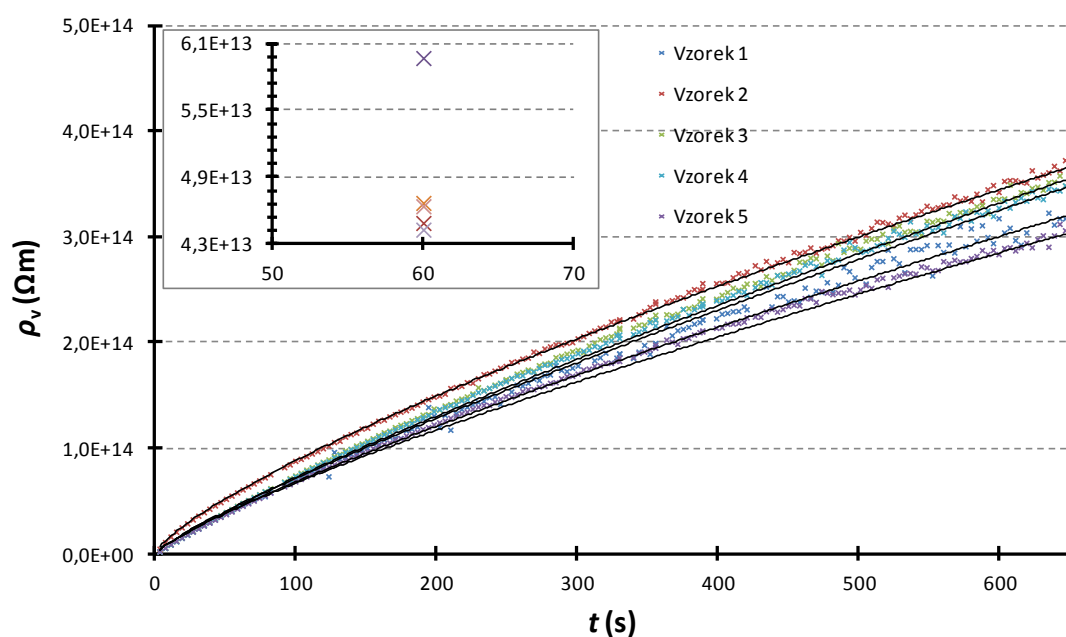
$$\rho_p = R_p \frac{\pi(d_1+g)}{g} = 1,25 \cdot 10^{15} \frac{\pi(0,05+0,01)}{0,01} = 2,36 \cdot 10^{16} \Omega, \quad (39)$$

kde ρ_p je povrchová rezistivita, R_p je povrchový odpor, d_1 je průměr chráněné měřicí elektrody a g je vzdálenost mezi elektrodami. Ostatní naměřené a vypočítané hodnoty pro hmotu SYNPO jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Naměřené a vypočítané hodnoty vzorků

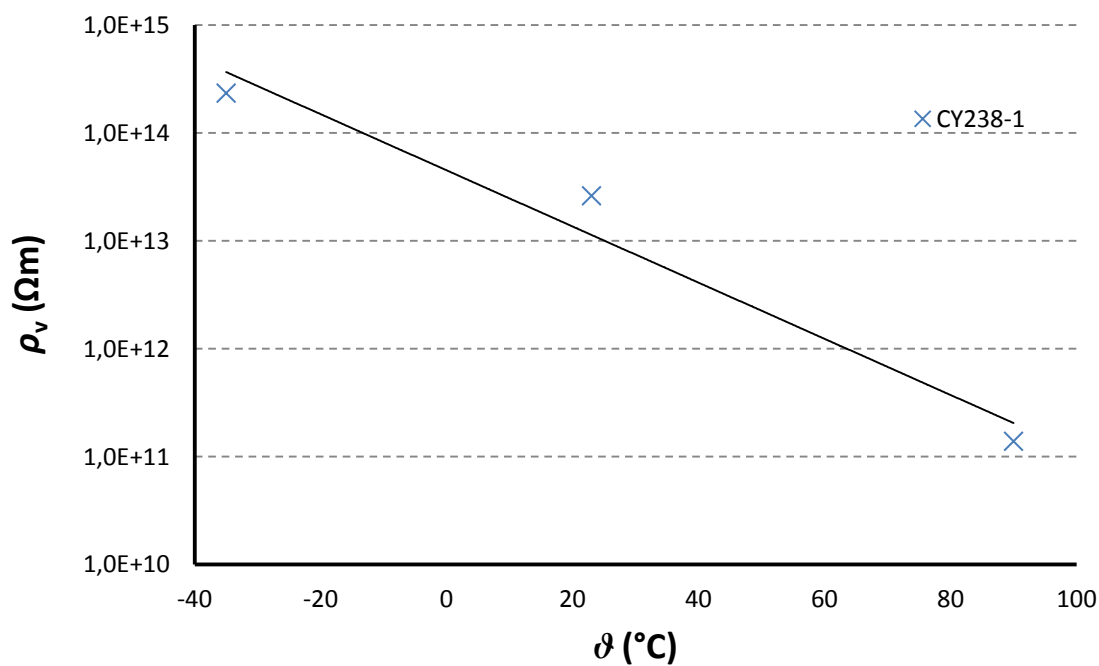
SYNPO hmota						
Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ωm]	ρ_p [Ω]	t [$^{\circ}C$]
1	3,14E+13	1,25E+15	1,98E-03	4,49E+13	2,36E+16	23±2
2	4,19E+13	1,28E+15	1,98E-03	5,97E+13	2,41E+16	
3	3,29E+13	1,31E+15	1,99E-03	4,67E+13	2,47E+16	
4	3,24E+13	1,20E+15	1,97E-03	4,64E+13	2,26E+16	
5	3,12E+13	1,34E+15	1,99E-03	4,43E+13	2,53E+16	
6	3,20E+13	1,67E+14	1,99E-03	4,55E+13	3,15E+15	
7	3,23E+13	1,33E+14	1,97E-03	4,63E+13	2,51E+15	
8	3,16E+13	1,14E+14	1,98E-03	4,51E+13	2,15E+15	
9	3,19E+13	1,15E+14	1,97E-03	4,58E+13	2,17E+15	
10	3,04E+13	1,00E+14	1,97E-03	4,37E+13	1,88E+15	

Grafická závislost na Obr. 32 uvádí časové závislosti vnitřních rezistivit jednotlivých vzorků epoxidové pryskyřice SYNPO hmoty při teplotě okolí. Vložený graf doplňuje uvedené závislosti o další hodnoty vnitřních rezistivit v čase 60 s, tj. v souladu s příslušnou normou. Identické závislosti pro ostatní hmoty a teploty jsou uvedny v příloze.



Obr. 32 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO hmota, 23 °C

Z naměřených časových závislostí vnitřních rezistivit při různých teplotách byla sestavena teplotní závislost rezistivity (v 60 s) uvedená na Obr. 33 pro hmotu CY238-1.



Obr. 33 Závislost vnitřní rezistivity na teplotě, CY238-1, 23 °C

Časové závislosti vnitřní rezistivity pro jednotlivé vzorky epoxidových pryskyřic, byly aproximovány mocninnou funkcí ve tvaru

$$\rho_v(t) = Bt^n. \quad (40)$$

Získaný koeficient n plně koresponduje s mocninným exponentem v rovnici vyjadřující časovou závislost nabíjecího proudu, danou vztahem

$$i(t) = A \cdot t^{-n} + I_{\text{vod}}. \quad (41)$$

Činitel mocninné funkce B v rovnici (40) byl využit ke stanovení koeficientu A v rovnici (41) s využitím vztahu

$$\rho_v = R_v \frac{S_{ef}}{h} = \frac{U \cdot S_{ef}}{i(t) \cdot h} = \frac{U \cdot S_{ef}}{A \cdot h} \cdot t^n, \quad (42)$$

$$\text{resp. } A = \frac{U \cdot S_{ef}}{B \cdot h}. \quad (43)$$

Jednotlivé hodnoty B a n jsou pro příklad uvedeny v Tab. 4 pro hmotu CY 238-1, 23 stupňů Celsia. Ostatní hodnoty jsou uvedeny v tabulkách v příloze 3.

Tab. 4 Vypočítané koeficienty mocninné funkce proudu

CY238-1 při teplotě 23 ± 2 °C					
Vzorek	1	2	3	4	5
$A [\text{A} \cdot \text{s}^{-1}]$	2,98E-09	2,41E-09	2,73E-09	2,43E-09	2,35E-09
$n [-]$	6,59E-01	6,55E-01	6,62E-01	6,43E-01	6,59E-01

2.4.4 Výpočet relativní permitivity

Pomocí výše uvedených měřicích přístrojů jsem změřil frekvenční charakteristiky kapacity a ztrátového činitele. Každý vzorek se měřil 10x po sobě pro rozsah frekvencí od 20 Hz do 2 MHz.

Relativní permitivita se stanoví z následující rovnice:

$$\varepsilon' = \frac{C_x}{C_0}, \quad (44)$$

kde C_0 je geometrická kapacita vzorků vypočítaná z geometrických rozměrů vzorku.

Geometrická kapacita se počítá ze vztahu:

$$C_0 = \varepsilon_0 \times \frac{A}{h}, \quad (45)$$

kde ε_0 je permitivita vakua, A je plocha elektrody a h je tloušťka měřeného vzorku.

Plocha elektrody se vypočítá vztahem:

$$A = \frac{\pi}{4} \times (d_1 + g)^2, \quad (46)$$

kde d_1 je šířka měřicí elektrody a g je vzdálenost mezi měřicí a ochrannou elektrodou.

Ztrátové číslo se vypočítá pomocí rovnice:

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta, \quad (47)$$

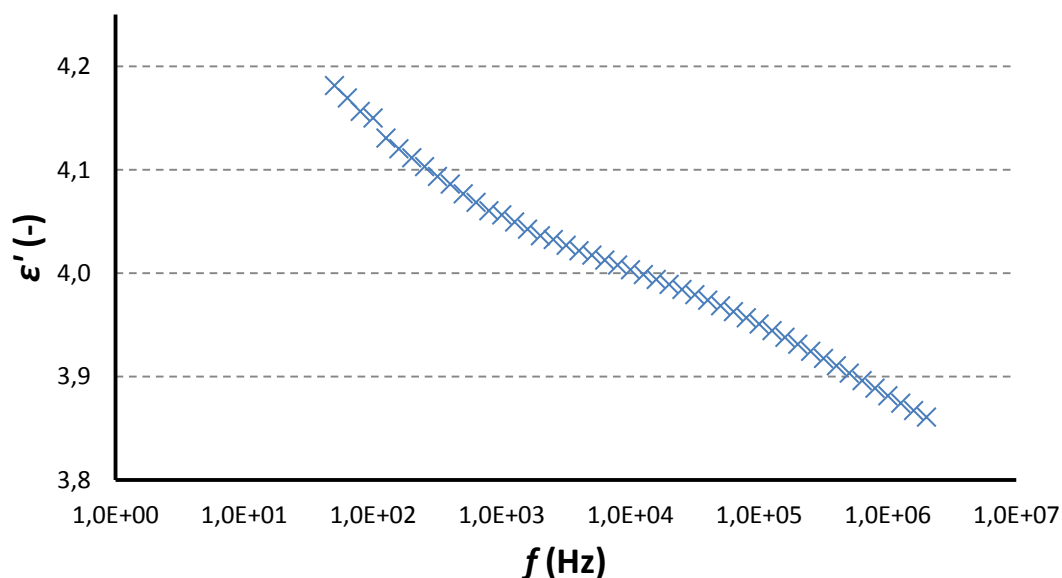
kde ε' je relativní permitivita a $\tan \delta$ je ztrátový úhel.

Ztrátový úhel se pak vypočítá pomocí rovnice:

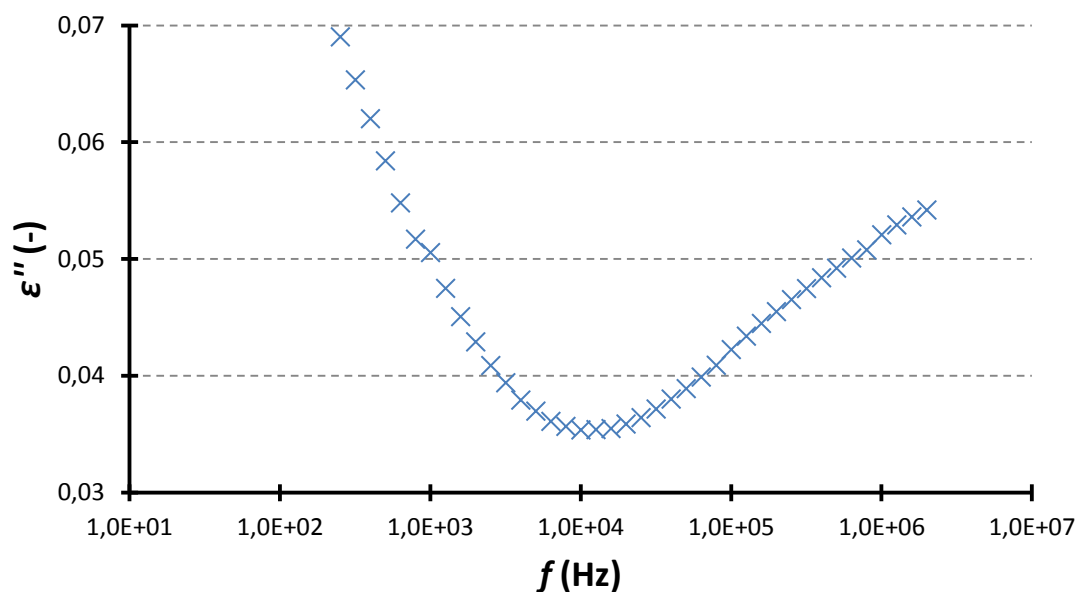
$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (48)$$

kde ε'' je ztrátové číslo a ε' je relativní permitivita.

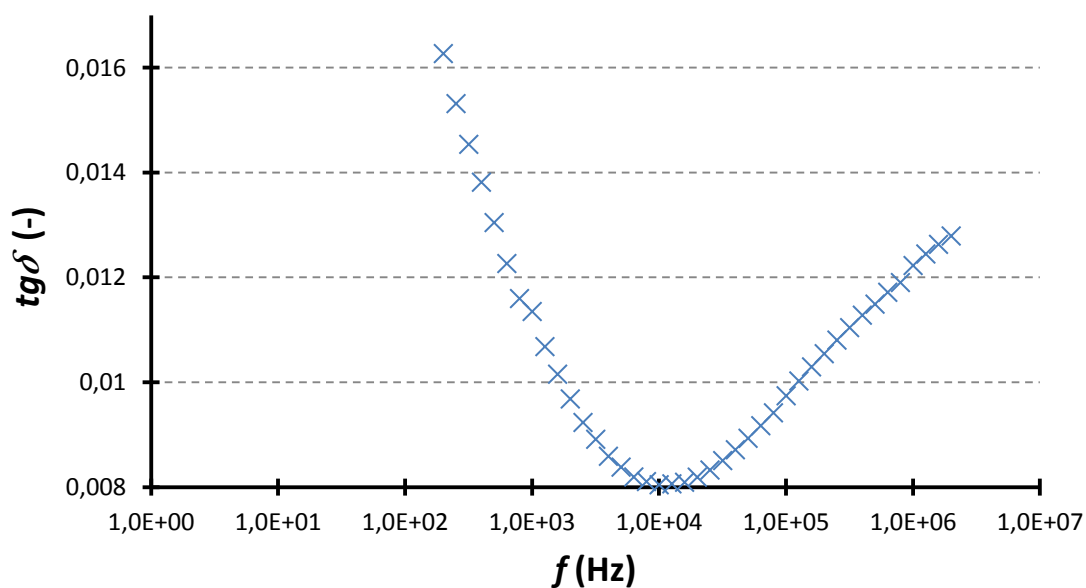
Frekvenční závislost složek komplexní permitivity a ztrátového činitele jsou pro SYNPO hmotu uvedeny na Obr. 34, Obr. 35 a Obr. 36. Uvedená křivka v daných grafech již reprezentuje střední hodnotu dané veličiny získanou z měření na deseti vzorcích epoxidových pryskyřic. Získané vyšší hodnoty relativní permitivity naznačují polární charakter epoxidových vzorků. Uvedená informace je rovněž patrná z frekvenčního průběhu ztrátového činitele i ztrátového čísla, které se z počátku vyznačuje poklesem obou veličin (možná souvislost s průběhem vodivostních ztrát) a od frekvence cca 10 kHz nabývají průběhy typického relaxačního maxima, které je z důvodu nižšího frekvenčního rozsahu ne zcela graficky vyjádřené.



Obr. 34 Frekvenční závislost relativní permitivity, SYNPO hmota, vzorky 1 až 10



Obr. 35 Frekvenční závislost ztrátového čísla, SYNPO hmota, vzorky 1 až 10



Obr. 36 Frekvenční závislost ztrátového činitele, SYNPO hmota, vzorky 1 až 10

2.4.5 Výpočet elektrické pevnosti

Průrazné napětí bylo měřeno v souladu s normou ČSN EN 60243-1: Elektrická pevnost izolačních materiálů – Zkušební metody – Část 1: Zkoušky při průmyslových kmitočtech.

Bylo nutné na tuto zkoušku měřicí přístroj připravit, protože byl uzpůsoben pro

měření elektrické pevnosti kapalin, nikoli tuhých vzorků. Jako první jsem obstaral kádinku, která představovala izolační nádobu vyrobenou z pvc. Do ní se umístily elektrody z mosazi vyrobené ve školní dílně. Elektrody byly připojeny vodičem k přístroji. Jako poslední věcí bylo obstarání transformátorového oleje, který je pro takovou zkoušku vhodný.

Samotná zkouška probíhala následujícím způsobem. Nejprve byla změřena tloušťka vzorků pomocí mikrometru. Vzorky se umístily do kádinky s transformátorovým olejem, kde byly připraveny elektrody. Poté byly vzorky vloženy mezi elektrody a následně se přivedlo napětí. Bylo měřeno průrazné napětí, které projde mezi elektrody a vzorkem.

Byl použit transformátorový olej, aby nedošlo k povrchovým přeskokům. Zkouška probíhala za pokojové teploty. Výpočet elektrické pevnosti uvádím pro první řádek tabulky č. 5 a provádí se pomocí následující rovnice

$$E_p = \frac{U_p}{d} = \frac{30,5}{1,986} = 15,36 \text{ kV/mm}, \quad (49)$$

kde E_p je elektrická pevnost, U_p je průrazné napětí a d je tloušťka měřeného vzorku.

V následujících tabulkách jsou uvedeny naměřené hodnoty tloušťky vzorků, průrazného napětí a vypočítané hodnoty elektrické pevnosti.

Tab. 5 SYNPO – průrazné napětí

Vzorek	t [°C]	h [mm]	U_p [kV]	E_p [kV/mm]
1	23±2	1,986	30,5	15,4
2	23±2	1,968	30	15,2
3	23±2	1,974	35	17,7
4	23±2	1,983	32	16,1
5	23±2	1,971	34	17,3

Tab. 6 CY 238-1 – průrazné napětí

Vzorek	t [°C]	h [mm]	U_p [kV]	E_p [kV/mm]
1	23±2	1,975	33,5	17,0
2	23±2	1,957	31	15,8
3	23±2	1,970	33	16,8
4	23±2	1,971	33	16,7
5	23±2	1,937	30	15,5

Na Obr. 37 je vyfoceno zařízení, na kterém se celé měření uskutečnilo. Zařízení je umístěno ve školní laboratoři.



Obr. 37 Měřicí přístroj na průrazné napětí

2.4.6 Teplotně stabilizované vzorky

Vzorky se nechaly teplotně stabilizovat ve sterilizační komoře při teplotě 120 °C po dobu 750 hodin. Teplotní stabilizaci bylo vystaveno 10 vzorků, vždy pět vzorků od každé hmoty. Před zahájením teplotní stabilizace byly u vzorků proměřeny elektrické vlastnosti, a to zejména vnitřní a povrchový odpor, relativní permitivita a ztrátový činitel.

Elektrické vlastnosti před teplotní stabilizací byly proměřeny zvláště proto, abychom zjištěné výsledky pak mohli srovnat s naměřenými výsledky hmot po stárnutí a sledovat tak účinky tohoto tepelného stárnutí na elektroizolační hmoty. Všechny výsledky a naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách níže. Pro příklad uvádím tabulky a grafické závislosti hmoty CY 238-1. Výsledky druhé stárnuté hmoty SYNPO jsou uvedeny v příloze 1. Hodnoty vnitřních a povrchových rezistivit zjištěných v 60 s od připojení elektrického pole jsou uvedeny v Tab. 7 a Tab. 8.

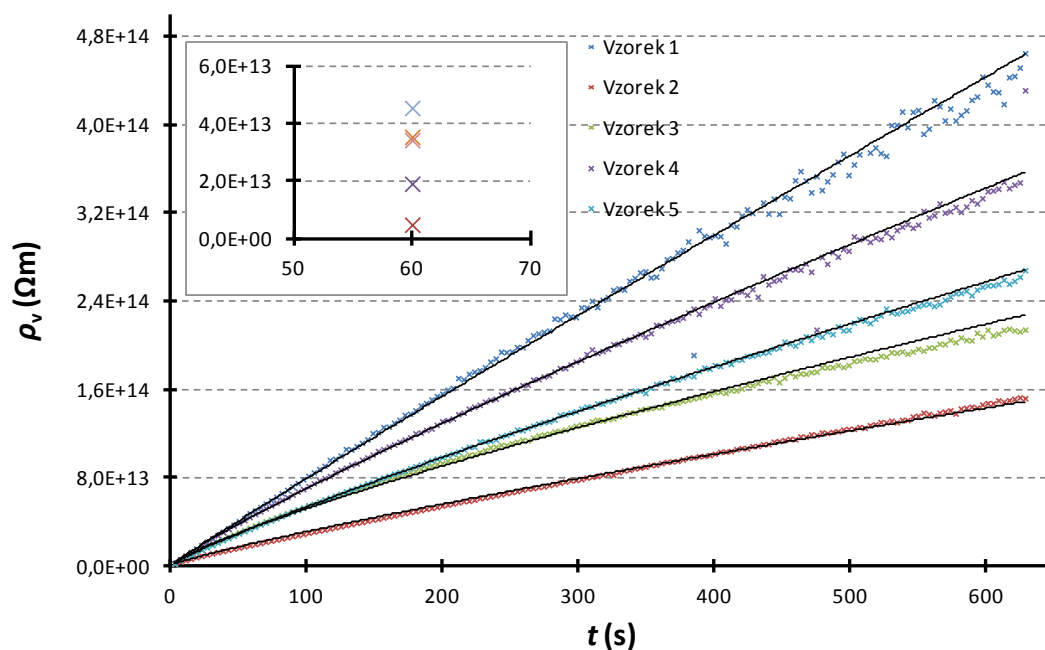
Tab. 7 Vzorky v původním stavu hmoty CY 238-1

Vzorek	$R_v [\Omega]$	$R_p [\Omega]$	$h [m]$	$\rho_v [\Omega m]$	$\rho_p [\Omega]$	$t [^\circ C]$
1	3,36E+12	5,68E+14	1,97E-03	4,82E+12	1,07E+16	23±2
2	1,32E+13	1,74E+15	1,95E-03	1,91E+13	3,28E+16	
3	2,47E+13	9,95E+14	1,97E-03	3,54E+13	1,88E+16	
4	3,19E+13	7,77E+14	1,98E-03	4,55E+13	1,46E+16	
5	2,39E+13	9,51E+14	1,97E-03	3,43E+13	1,79E+16	

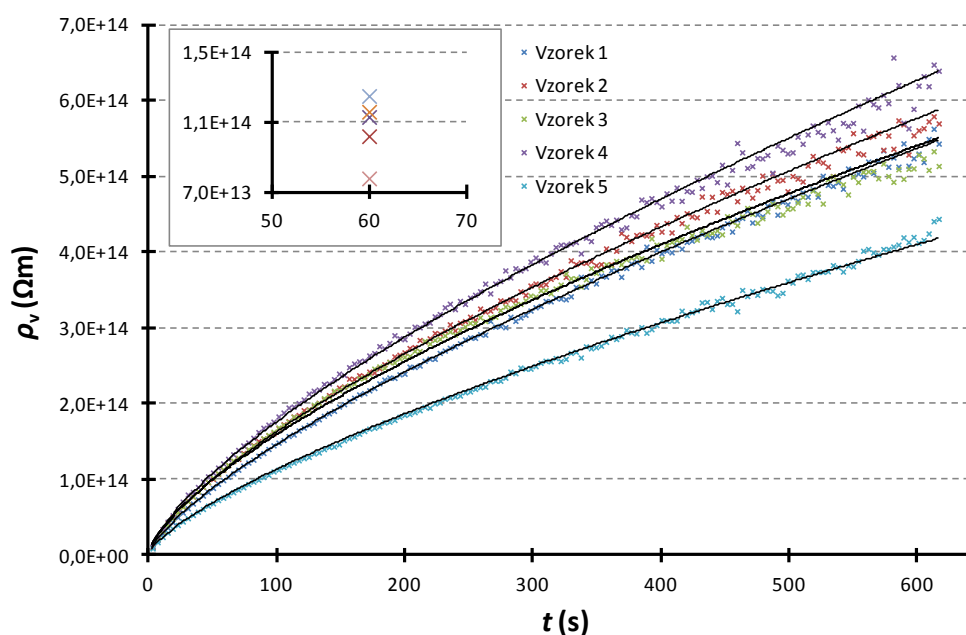
Tab. 8 Teplotě stabilizované vzorky hmoty CY 238-1

Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ωm]	ρ_p [Ω]	t [$^{\circ}\text{C}$]
1	7,08E+13	1,58E+15	1,97E-03	1,02E+14	2,98E+16	23 \pm 2
2	7,78E+13	1,18E+15	1,95E-03	1,13E+14	2,22E+16	
3	8,09E+13	9,97E+14	1,97E-03	1,16E+14	1,88E+16	
4	8,76E+13	1,60E+15	1,98E-03	1,25E+14	3,02E+16	
5	5,43E+13	2,46E+15	1,97E-03	7,79E+13	4,64E+16	

Níže uvedené závislosti znázorněné na Obr. 38 a Obr. 39 slouží k porovnání časových závislostí vnitřních rezistivit vzorků epoxidových pryskyřic CY238-1 hmoty v původním stavu a po dlouhou expozici při teplotě odpovídající tepelné třídě E. Na Obr. 39 je patrné zvýšení hodnot vnitřních rezistivit v důsledku teplotní stabilizace a dokončení procesu prostorového zesíťování zbylých komponent. Vložené grafy opět doplňují časové závislosti průběhu vnitřní rezistivity o hodnoty v 60 s měření. Časové závislosti průběhu vnitřní rezistivity hmoty SYNPO jsou uvedeny v příloze 4.



Obr. 38 Závislost vnitřní rezistivity na čase, vzorky v původním stavu, CY 238-1



Obr. 39 Závislost vnitřní rezistivity na čase, teplotně stabilizované vzorky, CY 238-1

2.5 Zkoušky mechanických vlastností

Zkoušky mechanických vlastností byly zaměřeny zvláště na zjištění modulů pružnosti. Jednalo se konkrétně o modul pružnosti v tahu, tlaku a ohybu. Hodnoty těchto modulů jsou uvedeny v tabulkách níže.

2.5.1 Zkouška tahem

Tahové zkoušky byly provedeny v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1, Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Obecné principy (2012). Měření bylo provedeno na zkušební stroji Zwick Z250 Allround-Line tCII s aktivovaným danamomentem o silovém rozsahu 50 kN. Teplota okolí, při níž měření probíhalo, byla 23 ± 2 °C. Prodloužení zkušebních těles bylo měřeno snímačem podélného prodloužení multiXtens, a to na délce 50 mm. Oba snímače byly aktivní po celou dobu zkoušky, tzn. až do lomu zkušební tělesa.

Elastické konstanty E_t (tahový modul pružnosti) a μ (Poissonovo číslo) byly určeny dvojím způsobem.

První způsob spočíval ve vyhodnocení tahového modulu jako sečny křivky napětí / poměrné prodloužení σ pro hodnoty poměrného prodloužení zkouška tlakem $\varepsilon_1=0,05\%$ a $\varepsilon_2=0,25\%$. Poissonovo číslo (Poissonův poměr) byl v tomto případě vyhodnocen jako negativní poměr příčného zúžení a podélného prodloužení v intervalu hodnot poměrného prodloužení $\varepsilon_1=0,3\%$ a $\varepsilon_2=0,6\%$

Druhý způsob měření a vyhodnocení elastických konstant E_t a μ spočíval ve stanovení těchto veličin ze dvou po sobě následujících zátěžových cyklů v elastické oblasti zatěžování. Limitní hodnoty deformací pro určení veličin E_t a μ byly shodné

s hodnotami použitými v předchozím případě.

Naměřené hodnoty zkoušky v tahu jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Naměřené a vypočítané hodnoty při zkoušce v tahu

Vzorek	t [°C]	b [mm]	h [mm]	F_m [N]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	μ [-]
1	23	10,47	4,37	3046	66,6	12200	0,34
2	23	10,18	4,39	2809	62,9	12000	0,41
3	23	10,25	4,37	3227	72	12100	0,36
4	23	10,36	4,34	2497	55,5	12200	0,42
5	23	10,2	4,35	2948	66,4	12100	0,57
6	23	10,27	4,35	3404	76,2	11900	0,16
7	23	10,27	4,37	2963	66	11900	0,33
8	23	10,42	4,33	3462	76,7	12000	0,45
9	23	10,22	4,3	2998	68,2	12800	0,44
10	23	10,31	4,33	2496	55,9	12100	0,23

B_0 je šířka zkušební tělesa, h je tloušťka zkušební tělesa, F je síla, σ_m je mez pevnosti, E_t je modul pružnosti v tahu a μ je Poissonovo číslo.

Příklad výpočtu meze pevnosti pro vzorek č. 1:

$$\sigma_m = \frac{3046}{45,75} = 66,6 \text{ MPa}, \quad (50)$$

kde σ_m je hodnota příslušného napětí, F je příslušná naměřená síla a A je počáteční průřez zkušební tělesa.

Modul pružnosti v tahu se pohybuje v rozmezí od 11900 MPa do 12800 MPa.

2.5.2 Zkouška tlakem

Zkoušky v tlaku byly provedeny v souladu s normou ČSN EN ISO 604, Plasty – stanovení tlakových vlastností (2004). Měření bylo provedeno při teplotě okolí 23 ± 2 °C na zkušebním stroji Zwick Z250 Allround-Line tCII s dynamometrem 50 kN a standardními leštěnými tlačnými deskami.

Deformace byla zaznamenávána snímačem multiXtens měřícím vzdálenost mezi tlačnými deskami. Pro měření modulu pružnosti v tlaku byl použit rovněž snímač multiXtens v konfiguraci pro měření podélné změny rozměru přímo na zkušebním tělese.

Naměřené hodnoty při zkoušce v tlaku jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 Naměřené hodnoty při zkoušce v tlaku

Vzorek	t [°C]	h_0 [mm]	a_0 [mm]	b_0 [mm]	S_0 [mm ²]	E_d [MPa]
1	23	50,26	10,09	15,09	152,26	12500
2	23	49,69	10	15,02	150,20	12500

3	23	50,45	10,02	15,08	151,10	13400
4	23	50,46	10,08	15,11	152,31	12200
5	23	50,81	9,77	15,22	148,70	13100
6	23	49,85	10,06	15,08	151,70	12700
7	23	49,76	9,65	15,06	145,33	13000
8	23	49,65	9,62	15,15	145,74	12900
9	23	49,72	10,09	15,09	152,26	13300
10	23	49,99	9,91	15,12	149,84	9080

H_0 délka zkušebního tělesa, a_0 je šířka zkušebního tělesa, b_0 je výška zkušebního tělesa, S_0 průřez zkušebního tělesa a E_d je modul pružnosti v tlaku.

Modul pružnosti v tlaku naměřených vzorků se pohybuje v rozmezí od 12500 MPa do 13 400 MPa.

2.5.3 Ohybová zkouška

Ohybové zkoušky byly provedeny v souladu s normou ČSN EN ISO, Plasty – Stanovení ohybových vlastností (2011). Zkušební tělesa byla zatěžována za pokojové teploty 23 ± 2 °C tříbodovým ohybem. Vzdálenost podpor byla vzhledem k připraveným tělesům zvolena 110 mm. Zkušební stroj byl Zwick Z250 Allround-Line tCII s dynamometrem 50 kN. Průhyb zkušebního tělesa byl zaznamenáván snímačem multiXtens.

Naměřené hodnoty při zkoušce v ohybu jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11 Naměřené hodnoty při zkoušce v ohybu

Vzorek	t [°C]	a_0 [mm]	b_0 [mm]	σ_M [MPa]	E_{mod} [MPa]
1	23	10,04	15,09	103,9	11500
2	23	10,13	15,05	91,5	11700
3	23	10,05	15,10	113,3	12200
4	23	9,84	15,12	129,1	12300
5	23	9,88	15,01	126,3	12100
6	23	10,06	15,13	123,9	11800
7	23	9,71	15,10	113,0	12000
8	23	10,09	15,05	113,6	12200
9	23	10,06	15,06	127,6	12300
10	23	9,78	15,16	106,0	11900

A_0 je výška zkušebního tělesa, b_0 je šířka zkušebního tělesa, σ_M je mez pevnosti a E_{mod} je modul pružnosti v ohybu.

Modul pružnosti v ohybu u naměřených vzorků se pohybuje od 11500 MPa do 12300 MPa.

3 ZÁVĚR

V rámci teoretické části byla provedena rešerše pojednávající o současném výzkumu vlastností elektroizolačních zalévacích hmot na bázi epoxidových pryskyřic a jejich využití v elektrotechnickém průmyslu, zvláště na jejich technologické zpracování, jako například využití vakuové a tlakové metody zalévání, činitele ovlivňující samotný materiál během výroby epoxidových produktů. Dále jsou zmíněny druhy izolačních materiálů a jejich vlastnosti, měřicí metody, experimenty v oblasti epoxidových pryskyřic a další.

Součástí diplomové práce byla příprava několika sad vzorků elektroizolačních zalévacích hmot ve spolupráci se společností ABB, s. r. o. Byly připraveny tři druhy vzorků pro měření elektrických a mechanických vlastností. Pro měření elektrických vlastností byly připraveny epoxidové destičky metodou tlakového lití. Pro měření mechanických vlastností byly připraveny tyčinky a kosti, rovněž metodou tlakového lití. Proměření mechanických vlastností bylo provedeno ve spolupráci s Fakultou strojního inženýrství, VUT v Brně na Ústavu materiálových věd a inženýrství ve specializované laboratoři.

V experimentální části práce byly provedeny výpočty polarizačních indexů, a to jak jednodinutového, tak i desetinutového. Hodnoty polarizačních indexů v počátečním stavu se nacházejí v intervalu od 3,5 pro případ jednodinutového do 7 pro desetinutový. Hodnoty vnitřní rezistivity při pokojové teplotě se u obou epoxidových hmot pohybují v řádech cca $1 \cdot 10^{13} \Omega m$. Povrchová rezistivita je pak o řád až dva vyšší a odpovídá hodnotám cca od $2 \cdot 10^{15}$ - $2 \cdot 10^{16} \Omega$. Při teplotě $-35^\circ C$ došlo k mírnému zvýšení vnitřní rezistivity, která je cca $1 \cdot 10^{14} \Omega m$. Větší rozdíl však může být pozorován při teplotě $90^\circ C$, kde se hodnota vnitřní rezistivity snížila až na hodnotu cca $1 \cdot 10^{11} \Omega m$.

U vzorků, vystavených dlouhodobé teplotní stabilizaci ($120^\circ C$ / 750 hodin), se hodnota vnitřní rezistivity zvýšila přibližně o jeden řád a dosahovala hodnot cca $1 \cdot 10^{14} \Omega m$. Časové závislosti vnitřní rezistivity byly aproximovány mocninnou funkcí včetně nalezení příslušných parametrů jednotlivých koeficientů. Z hodnot korelačního koeficientu R , resp. koeficientu determinace R^2 lze usuzovat na velmi dobrou shodu naměřených dat a aproximované funkce. Využití mocninné funkce indikuje existenci více druhů vázaných nábojů a rozptyl jejich relaxačních dob ve struktuře sledovaných epoxidových hmot.

Z chování epoxidových pryskyřic ve střídavém elektrickém poli a následných vypočtených složek komplexní permitivity lze usuzovat na slabě polární charakter daného materiálu, což se projevuje vyšší hodnotou (5 - 3,5) reálné části komplexní permitivity v celém frekvenčním rozsahu. Průběh imaginární složky komplexní permitivity u vzorků v počátečním stavu vykazuje strmý pokles v oblasti nižších frekvencí. Tento pokles je přisuzován vodivostní složce tvořenou ztrátovým činitelem, případně dalšímu pomalému polarizačnímu mechanismu ve struktuře materiálu. Z pohledu měřeného frekvenčního rozsahu to nelze jednoznačně určit. Po teplotní stabilizaci dojde k odstranění tohoto jevu a k poklesu hodnot ztrátového čísla přibližně o polovinu původní hodnoty. Působením teploty odpovídající dané tepelné třídě (E) epoxidového materiálu má za následek dodatečné prostorové zesíťování struktury a odstranění polárních zbytků komponent při výrobě epoxidových vzorků.

Elektrická pevnost byla vypočítána z naměřeného průrazného napětí a tloušťky epoxidových vzorků. Zkouška byla provedena při pokojové teplotě v transformátorovém oleji. Hodnoty vypočtené elektrické pevnosti jsou u obou hmot podobné. Medián elektrické pevnosti u CY238-1 hmoty je 16,7 kV/mm, u SYNPO hmoty nabývá hodnot 16,1 kV/mm.

Z mechanických vlastností byly stanoveny moduly pružnosti v tahu, ohybu a při tlaku. Modul pružnosti v tahu se pohybuje v rozmezí hodnot od 11900 MPa do 12800 MPa. Modul pružnosti v ohybu u naměřených vzorků je od 11500 MPa do 12300 MPa. Modul pružnosti při tlaku nabývá hodnot od 12500 MPa do 13 400 MPa. U plastů dosahují hodnoty modulů pružnosti mnohem menších hodnot, než u materiálů kovových, ale i tak můžeme říci, že vzorky epoxidových pryskyřic mají dobrou mechanickou pevnost.

LITERATURA

- [1] HLUCHÝ, M. a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1 – 1. Díl, Nauka o materiálu*. Praha: Scientila, spol. s r. o, pedagogické nakladatelství, 2002. ISBN 80-7183-262-6.
- [2] LOYDA, M., Vlastimil ŠPONER, Ladislav ONDRÁČEK, Alexander BAREŠ a kolektiv. *Svařování termoplastů*. UNO Praha, s. r. o. Praha, 2011. ISBN 978-80-904949-0-9.
- [3] HRUBÝ, V., Miroslav GREGER, Jiří NĚMEC a Arnošt SILBERNAGEL. *Přehled materiálového inženýrství*. KOVOSIL. Ostrava, 2010. ISBN 978-80-903694-5-0.
- [4] VOJTĚCH, D. *Materiály a jejich mezní stavy*. VŠCHT Praha. Praha, 2010. ISBN 978-80-7080-741-5.
- [5] LIDAŘÍK, M. *Epoxidové pryskyřice*. Třetí, přepracované a rozšířené vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, n. p., 1983.
- [6] DUCHÁČEK, V. *Polymery, výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. VŠCHT Praha. Praha, 2006. ISBN 80-7080-617-6, 80-7080-241-3(1. Vyd.).
- [7] EHRENSTEIN, G. *Polymerní kompozitní materiály*. SCIENTIA, spol. s. r. o.: Praha, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] BHATNAGAR, M. *Epoxy resins*. CRC Press, Inc, 1996. The Polymeric Materials Encyclopedia [cit. 15. Dubna 2014]. Dostupné z: <http://www.ieee.org/index.html>.
- [9] MIKOVCOVÁ, P. *Stupeň konverze reaktoplastických pryskyřic*. Plzeň, FEL ZČU. Dostupné z: <http://ketrsv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/61.pdf>
- [10] DODD, S., N. M. CHALASHKANOV, J.C. FOTHERGILL a L.A. DISSADO. *Influence of the Temperature on the Dielectric Properties of Epoxy Resins*. Německo, 2010. 4 p. International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany. Department of Engineering, University of Leicester [cit. 18. Dubna 2014]. Dostupné z: <http://www.ieee.org/index.html>.
- [11] MIJOVIC, J. a Benjamin D. FITZ. *Dielectric Spectroscopy of Reactive Polymers*. NY, 1998. Department of Chemical Engineering, Chemistry and Materials Science, Polytechnic University [cit. 18. Dubna 2014]. Dostupné z: <http://www.ieee.org/index.html>.
- [12] LUTZ, B. a J. KINDERSBERGER. *Influence of Absorbed Water on Volume Resistivity of Epoxy Resin Insulators*. Germany, 2010. Technische Universität München. ISBN 978-1-4244-7944-3.
- [13] RASCHKA, D. *Technologie izolačních systémů pro aplikaci v oblasti vysokonapětových měřících zařízeních*. Brno, 2012. 48 s. [cit. 2014-04-08].
- [14] ŠVORČÍK, V. *Struktura a vlastnosti speciálních polymerů*. VŠCHT Praha. Praha 1992. ISBN 80-7080-139-5.
- [15] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [16] SHIGUE C, Rafaela G. S. dos SANTOS, Carlos A. BALDON a Ernesto RUPPERT-FILHO. *Monitoring the Epoxy Curing by the Dielectric Thermal Analysis Method*. IEEE, 2004.
- [17] BOČEK, J. *Polymerní nanokompozitní materiály a jejich vliv na elektrické vlastnosti*. Katedra technologií a měření, ZČU v Plzni.

- [18] POLSTEROVÁ, H. *Teplotní změny elektrických vlastností nanokompozitu na bázi epoxidové pryskyřice*. Brno, 2011. Electroscopic – online časopis pro elektrotechniku.
- [19] 3M ELEKTRO, *Řešení pro výrobu transformátorů, elektromotorů a elektroniky*. [online] [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: http://www.g3.cz/img/Katalog/Elektro/3M_Pryskyrice_a_zalev.hmoty.pdf
- [20] ZÁLIŠ, K. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Praha: Academie, 2005. ISBN 80-200-1358-X.
- [21] MENTLIK, V., Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. BEN – technická literatura. Praha, 2008. ISBN: 978-80-7300-232-9.
- [22] HEPBURN, M. D, I. J. KEMP, R. T. RICHARDSON a A. J. SHIELDS. *Partial discharge dressing of epoxy resin surfaces*. Glasgow Caledonian University, U. K [cit. 12 Dubna 2014]. Dostupné z: <http://www.ieee.org/index.html>.
- [23] TRNKA, P., Josef PIHERA a Martin ŠIRŮČEK. *Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech*. Plzeň, 2010. ELEKTRO, časopis pro elektrotechniku. Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni.
- [24] MORWITZOVÁ, G. *Klimatotechnologické zkušebnictví*. Plzeň, FEL ZČU. Dostupné z: <http://ketsy.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/47.pdf>
- [25] RASCHKA D. a Petr MICHLÍČEK. *Advanced CFD application in medium-voltage instrument transformers and sensors development and manufacturing*. Proceedings of Electric Power Engineering, 2014. ISBN 978-80-214-4094-4, 99 427-430
- [26] RASCHKA, D. a Petr MICHLÍČEK. *Insulating systems of the medium-voltage instrument transformers optimization by using advanced numerical CFD application*. ABB Technology Centre, Brno.
- [27] DRÁPALA, J a Miroslav KURSA. *Elektrotechnické materiály – učební text*. Ostrava, 2012. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [28] FIALA, J., Václav MENTL a Pavol ŠUTTA. *Struktura a vlastnosti materiálů*. ACADEMIA- nakladatelství AVČR. Praha, 2003. ISBN 80-200-1223-0.
- [29] KAZELLE J., Karel LIEDERMANN, Josef JIRÁK, Svatopluk HAVLÍČEK, Jiří VANĚK, Zdenka ROZSÍVALOVÁ a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*. Brno. FEKT VUT v Brně.
- [30] TRNKA, P. a R. POLANSKÝ. *Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír*. Katedra technologií a měření, ZČU v Plzni.
- [31] JIRÁK, J., Rudolf AUTRATA, Karel LIEDERMANN, Zdenka ROZSÍVALOVÁ a Marie SEDLAŘÍKOVÁ. *Materiály a technická dokumentace*. Brno. FEKT VUT v Brně.
- [32] TRNKA, P. *Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů*. Katedra technologií a měření, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

E_p	[kV/mm]	Elektrická pevnost
U_p	[V]	Průrazné napětí
d	[m]	Tloušťka vzorku
R_v	[Ω]	Vnitřní odpor
R_p	[Ω]	Povrchový odpor
σ_v	[Ω m]	Vnitřní rezistivita
σ_p	[Ω]	Povrchová rezistivita
p_{i1}	[-]	Jednominutový polarizační index
p_{i10}	[-]	Desetiminutový polarizační index
ε'	[-]	Relativní permitivita
ε''	[-]	Ztrátové číslo
$tg\delta$	[-]	Ztrátový úhel
t	[°C]	Teplota
a_0	[mm]	Výška zkušebního tělesa
b_0	[mm]	Šířka zkušebního tělesa
σ_M	[MPa]	Mez pevnosti
E_{mod}	[MPa]	Modul pružnosti ohybu
h_0	[mm]	Délka zkušebního tělesa
S_0	[mm ²]	Průřez zkušebního tělesa
E_d	[MPa]	Modul pružnosti v tlaku
F	[N]	Síla
E_t	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
μ	[-]	Poissonovo číslo
h	[m]	Tloušťka vzorku
d_l	[m]	Průměr měřicí elektrody
g	[m]	Vzdálenost měřicí a ochranné elektrody
C_0	[F]	Geometrická kapacita
C_x	[F]	Kapacita Kondenzátoru
A	[A.s ⁻¹]	Materiálová konstanta
n	[-]	Součinitel mocninné funkce

PŘÍLOHY

Příloha 1: Hodnoty vypočtených rezistivit

Tab. 12 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 hmota při teplotě 23 ± 2 °C

Tab. 13 Vypočítané hodnoty, SYNPO při teplotě 90 °C

Tab. 14 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 hmota při teplotě 90 °C

Tab. 15 Vypočítané hodnoty, SYNPO hmota při teplotě -35 °C

Tab. 16 Vypočítané hodnoty, CY238-1 hmota při teplotě -35 °C

Tab. 17 Vypočítané hodnoty, SYNPO hmota – vzorky v původním stavu

Tab. 18 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 – vzorky v původním stavu

Tab. 19 Vypočítané hodnoty, SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky

Tab. 20 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 hmota, teplotně stabilizované vzorky

Příloha 2: Hodnoty vypočtených polarizačních indexů

Tab. 21 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota při teplotě 23 ± 2 °C

Tab. 22 Polarizační indexy, SYNPO hmota při teplotě 90 °C

Tab. 23 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota při teplotě 90 °C

Tab. 24 Polarizační indexy, SYNPO hmota při teplotě -35 °C

Tab. 25 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota při teplotě – 35 °C

Tab. 26 Polarizační indexy, SYNPO hmota – vzorky v původním stavu

Tab. 27 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota – vzorky v původním stavu

Tab. 28 Polarizační indexy, SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky

Tab. 29 Polarizační indexy, CY238-1 hmota – teplotně stabilizované vzorky

Příloha 3: Vypočítané koeficienty mocninné funkce proudu

Tab. 30 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota při teplotě 23 ± 2 °C

Tab. 31 Vypočítané koeficienty, CY238-1 hmota při teplotě -35 °C

Tab. 32 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota při teplotě -35 °C

Tab. 33 Vypočítané koeficienty, CY238-1 hmota – vzorky v původním stavu

Tab. 34 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota – vzorky v původním stavu

Tab. 35 Vypočítané koeficienty, CY238-1 hmota – teplotně stabilizované vzorky

Tab. 36 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky

Příloha 4: Grafické závislosti vnitřních rezistivit

Obr. 40 Závislost vnitřní rezistivity na čase, CY 238-1, 23 °C

Obr. 41 Závislost vnitřní rezistivity na čase, CY 238-1, -35 °C

Obr. 42 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO, -35 °C

Obr. 43 Závislost vnitřní rezistivity na čase, vzorky v původním stavu, CY238-1

Obr. 44 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO hmota - vzorky v původním stavu

Obr. 45 Závislost vnitřní rezistivity na čase, CY 238-1- teplotně stabilizované vzorky

Obr. 46 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO hmota - teplotně stabilizované vzorky

Obr. 47 Závislost vnitřní rezistivity na teplotě, SYNPO

Příloha 5: CD-ROM

Příloha 1: Výpočty a hodnoty naměřených rezistivit

Tab. 12 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 hmota při teplotě 23 ± 2 °C

CY 238-1 hmota						
Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ω m]	ρ_p [Ω]	t [°C]
1	1,59E+13	6,06E+14	1,97E-03	2,29E+13	1,14E+16	23±2
2	1,94E+13	5,03E+14	1,98E-03	2,77E+13	9,48E+15	
3	1,76E+13	5,57E+14	1,97E-03	2,52E+13	1,05E+16	
4	1,84E+13	4,92E+14	2,00E-03	2,60E+13	9,27E+15	
5	2,03E+13	4,74E+14	1,98E-03	2,90E+13	8,93E+15	
6	2,05E+13	8,35E+13	2,01E-03	2,89E+13	1,57E+15	
7	1,95E+13	7,45E+13	1,98E-03	2,79E+13	1,40E+15	
8	1,94E+13	7,24E+13	1,96E-03	2,81E+13	1,36E+15	
9	1,84E+13	6,92E+13	1,98E-03	2,63E+13	1,30E+15	
10	3,70E+13	1,70E+14	1,97E-03	5,31E+13	3,20E+15	

Tab. 13 Vypočítané hodnoty, SYNPO při teplotě 90 °C

SYNPO hmota						
Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ω m]	ρ_p [Ω]	t [°C]
1	8,18E+13	2,65E+14	1,98E-03	1,17E+14	5,00E+15	90
2	2,71E+11	1,96E+14	1,98E-03	3,86E+11	3,69E+15	
3	5,62E+13	7,23E+14	1,99E-03	7,99E+13	1,36E+16	
4	7,03E+11	1,87E+14	1,97E-03	1,01E+12	3,52E+15	
5	3,44E+11	1,59E+14	1,99E-03	4,88E+11	3,00E+15	
6	1,30E+11	9,03E+12	1,99E-03	1,85E+11	1,70E+14	
7	1,38E+11	7,80E+12	1,97E-03	1,98E+11	1,47E+14	
8	1,34E+11	4,89E+12	1,98E-03	1,91E+11	9,22E+13	
9	1,27E+11	9,66E+12	1,97E-03	1,82E+11	1,82E+14	
10	1,51E+11	8,89E+12	1,97E-03	2,17E+11	1,68E+14	

Tab. 14 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 hmota při teplotě 90 °C

CY 238-1 hmota						
Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ω m]	ρ_p [Ω]	t [°C]
1	1,17E+11	6,08E+13	1,97E-03	1,68E+11	1,15E+15	90
2	7,50E+10	1,82E+13	1,98E-03	1,07E+11	3,43E+14	
3	8,74E+10	2,98E+13	1,97E-03	1,25E+11	5,62E+14	
4	9,33E+10	4,06E+13	2,00E-03	1,32E+11	7,65E+14	
5	1,14E+11	3,03E+13	1,98E-03	1,63E+11	5,71E+14	

6	1,28E+11	9,69E+12	2,01E-03	1,80E+11	1,83E+14
7	9,59E+10	3,49E+13	1,98E-03	1,37E+11	6,58E+14
8	1,12E+11	2,15E+13	1,96E-03	1,62E+11	4,05E+14
9	9,96E+10	1,68E+13	1,98E-03	1,43E+11	3,17E+14
10	1,18E+11	2,84E+13	1,97E-03	1,69E+11	5,35E+14

Tab. 15 Vypočítané hodnoty, SYNPO hmota při teplotě -35 °C

SYNPO hmota						
Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ω m]	ρ_p [Ω]	t [°C]
1	1,36E+14	8,83E+15	1,98E-03	1,95E+14	1,66E+17	-35
2	1,69E+14	4,72E+15	1,98E-03	2,41E+14	8,90E+16	
3	1,30E+14	4,74E+15	1,99E-03	1,85E+14	8,93E+16	
4	8,68E+13	4,72E+15	1,97E-03	1,24E+14	8,90E+16	
5	7,05E+13	8,83E+15	1,99E-03	1E+14	1,66E+17	
6	7,33E+13	5,10E+15	1,99E-03	1,04E+14	9,61E+16	
7	7,21E+13	8,26E+15	1,97E-03	1,03E+14	1,56E+17	
8	7,85E+13	2,88E+15	1,98E-03	1,12E+14	5,42E+16	
9	7,37E+13	3,74E+15	1,97E-03	1,06E+14	7,05E+16	
10	6,88E+13	2,33E+15	1,97E-03	9,88E+13	4,39E+16	

Tab. 16 Vypočítané hodnoty, CY238-1 hmota při teplotě -35 °C

CY 238-1 hmota						
Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ω m]	ρ_p [Ω]	t [°C]
1	1,68E+14	4,37E+15	1,97E-03	2,42E+14	8,24E+16	-35
2	1,78E+14	1,51E+16	1,98E-03	2,54E+14	2,85E+17	
3	1,88E+14	5,23E+15	1,97E-03	2,7E+14	9,86E+16	
4	1,84E+14	5,45E+15	2,00E-03	2,6E+14	1,03E+17	
5	1,02E+14	3,40E+15	1,98E-03	1,46E+14	6,41E+16	
6	8,78E+13	1,88E+15	2,01E-03	1,24E+14	3,54E+16	
7	8,18E+13	6,42E+15	1,98E-03	1,17E+14	1,21E+17	
8	9,18E+13	1,82E+15	1,96E-03	1,33E+14	3,43E+16	
9	8,48E+13	8,16E+15	1,98E-03	1,21E+14	1,54E+17	
10	8,68E+13	2,25E+15	1,97E-03	1,25E+14	4,24E+16	

Tab. 17 Vypočítané hodnoty, SYNPO hmota – vzorky v původním stavu

SYNPO hmota – vzorky v původním stavu						
Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ω m]	ρ_p [Ω]	t [$^{\circ}$ C]
1	7,08E+12	1,68E+13	1,98E-03	1,01E+13	3,17E+14	23 \pm 2
2	9,06E+12	1,97E+13	1,97E-03	1,30E+13	3,71E+14	
3	2,59E+13	7,68E+13	1,98E-03	3,70E+13	1,45E+15	
4	1,48E+13	1,69E+13	1,95E-03	2,14E+13	3,19E+14	
5	1,35E+13	1,86E+15	1,97E-03	1,93E+13	3,51E+16	

Tab. 18 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 – vzorky v původním stavu

CY 238-1 hmota – vzorky v původním stavu						
Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ω m]	ρ_p [Ω]	t [$^{\circ}$ C]
1	3,36E+12	5,68E+14	1,97E-03	4,82E+12	1,07E+16	23 \pm 2
2	1,32E+13	1,74E+15	1,95E-03	1,91E+13	3,28E+16	
3	2,47E+13	9,95E+14	1,97E-03	3,54E+13	1,88E+16	
4	3,19E+13	7,77E+14	1,98E-03	4,55E+13	1,46E+16	
5	2,39E+13	9,51E+14	1,97E-03	3,43E+13	1,79E+16	

Tab. 19 Vypočítané hodnoty, SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky

SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky						
Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ω m]	ρ_p [Ω]	t [$^{\circ}$ C]
1	3,44E+13	1,22E+15	1,98E-03	4,90E+13	2,30E+16	23 \pm 2
2	8,18E+13	2,16E+15	1,97E-03	1,18E+14	4,07E+16	
3	6,07E+13	1,80E+15	1,98E-03	8,66E+13	3,39E+16	
4	5,07E+13	2,75E+15	1,95E-03	7,35E+13	5,18E+16	
5	5,83E+13	1,50E+15	1,97E-03	8,35E+13	2,83E+16	

Tab. 20 Vypočítané hodnoty, CY 238-1 hmota, teplotně stabilizované vzorky

CY 238-1 – teplotně stabilizované vzorky						
Vzorek	R_v [Ω]	R_p [Ω]	h [m]	ρ_v [Ω m]	ρ_p [Ω]	t [$^{\circ}$ C]
1	7,08E+13	1,58E+15	1,97E-03	1,02E+14	2,98E+16	23 \pm 2
2	7,78E+13	1,18E+15	1,95E-03	1,13E+14	2,22E+16	
3	8,09E+13	9,97E+14	1,97E-03	1,16E+14	1,88E+16	
4	8,76E+13	1,60E+15	1,98E-03	1,25E+14	3,02E+16	
5	5,43E+13	2,46E+15	1,97E-03	7,79E+13	4,64E+16	

Příloha 2: Naměřené a vypočítané hodnoty polarizačních indexů

Tab. 21 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota při teplotě 23 ± 2 °C

CY 238-1 hmota při teplotě 23 ± 2 °C								
Vzorek	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	p_{il} [-]	pi_{10} [-]
1	15	8,911E-11	60	3,14E-11	600	7,009E-12	2,8	4,5
2	15	7,689E-11	60	2,572E-11	600	5,894E-12	3,0	4,4
3	15	7,839E-11	60	2,841E-11	600	6,355E-12	2,8	4,5
4	15	7,889E-11	60	2,715E-11	600	6,31E-12	2,9	4,3
5	15	7,413E-11	60	2,467E-11	600	5,506E-12	3,0	4,5

Tab. 22 Polarizační indexy, SYNPO hmota při teplotě 90 °C

SYNPO hmota při teplotě 90 °C								
Vzorek	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	p_{il} [-]	pi_{10} [-]
1	15	8,178E-11	60	6,116E-12	600	2,046E-12	13,4	3,0
2	15	5,027E-9	60	1,847E-9	600	1,378E-9	2,7	1,3
3	15	9,673E-11	60	8,894E-12	600	3,166E-12	10,9	2,8
4	15	2,522E-9	60	7,112E-10	600	4,046E-10	3,6	1,8
5	15	4E-9	60	1,454E-9	600	1,166E-9	2,8	1,3

Tab. 23 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota při teplotě 90 °C

CY 238-1 hmota při teplotě 90 °C								
Vzorek	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	p_{il} [-]	pi_{10} [-]
1	15	7,659E-9	60	4,268E-9	600	3,878E-9	1,8	1,1
2	15	1,057E-8	60	6,664E-9	600	6,216E-9	1,6	1,1
3	15	9,555E-9	60	5,724E-9	600	5,388E-9	1,7	1,1
4	15	8,967E-9	60	5,358E-9	600	4,336E-9	1,7	1,2
5	15	7,852E-9	60	4,377E-9	600	3,286E-9	1,8	1,3

Tab. 24 Polarizační indexy, SYNPO hmota při teplotě -35 °C

SYNPO hmota při teplotě -35 °C								
Vzorek	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	p_{il} [-]	pi_{10} [-]
1	15	2,301E-11	60	7,093E-12	600	9,81E-13	3,2	7,2
2	15	1,203E-11	60	2,953E-12	600	3,631E-13	4,1	8,1
3	15	1,411E-11	60	3,854E-12	600	3,905E-13	3,7	9,9
4	15	2,127E-11	60	5,764E-12	600	4,381E-13	3,7	13,2
5	15	1,263E-11	60	3,683E-12	600	4,322E-13	3,4	8,5

Tab. 25 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota při teplotě – 35 °C

CY 238-1 hmota při teplotě – 35 °C								
Vzorek	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	p_{il} [-]	pi_{i0} [-]
1	15	9,014E-12	60	2,985E-12	600	3,276E-13	3,0	9,1
2	15	9,685E-12	60	2,806E-12	600	3,563E-13	3,5	7,9
3	15	9,154E-12	60	2,657E-12	600	3,092E-13	3,5	8,6
4	15	9,343E-12	60	2,718E-12	600	7,485E-13	3,4	3,6
5	15	1,646E-12	60	4,911E-12	600	7,528E-13	3,5	6,5

Tab. 26 Polarizační indexy, SYNPO hmota – vzorky v původním stavu

Vzorky v původním stavu, SYNPO hmota při teplotě 23 ± 2 °C								
Vzorek	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	p_{il} [-]	pi_{i0} [-]
1	15	1,626E-10	60	7,066E-11	600	1,267E-11	2,3	5,6
2	15	1,367E-10	60	5,521E-11	600	9,188E-11	2,5	6,0
3	15	6,708E-11	60	1,934E-11	600	2,397E-12	3,5	8,1
4	15	1,018E-10	60	3,374E-11	600	5,081E-12	3,0	6,6
5	15	9,026E-11	60	3,709E-11	600	7,543E-12	2,4	4,9

Tab. 27 Polarizační indexy, CY 238-1 hmota – vzorky v původním stavu

Vzorky v původním stavu, CY 238-1 hmota při teplotě 23 ± 2 °C								
Vzorek	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	p_{il} [-]	pi_{i0} [-]
1	15	6,006E-11	60	1,489E-11	600	1,765E-12	4,0	8,4
2	15	1,137E-10	60	3,79E-11	600	4,99E-12	3,0	7,6
3	15	6,987E-11	60	2,023E-11	600	3,44E-12	3,5	5,9
4	15	5,711E-11	60	1,569E-11	600	2,207E-12	3,6	7,1
5	15	7,31E-11	60	2,092E-11	600	2,829E-12	3,5	7,4

Tab. 28 Polarizační indexy, SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky

Teplotně stabilizované vzorky, SYNPO hmota při teplotě 23 ± 2 °C								
Vzorek	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	p_{il} [-]	pi_{10} [-]
1	15	3,11E-11	60	1,451E-11	600	3,893E-12	2,1	3,7
2	15	1,757E-11	60	6,114E-12	600	1,716E-12	2,9	3,6
3	15	2,29E-11	60	8,242E-12	600	1,737E-12	2,8	4,7
4	15	2,591E-11	60	9,855E-12	600	2,08E-12	2,6	4,7
5	15	2,314E-11	60	8,572E-12	600	2,177E-12	2,7	3,9

Tab. 29 Polarizační indexy, CY238-1 hmota – teplotně stabilizované vzorky

Teplotně stabilizované vzorky, CY 238-1 hmota při teplotě 23 ± 2 °C								
Vzorek	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	t [s]	I_{nab} [A]	p_{il} [-]	pi_{10} [-]
1	15	1,964E-11	60	7,064E-12	600	1,343E-12	2,8	5,3
2	15	1,694E-11	60	6,427E-12	600	1,286E-12	2,6	5,0
3	15	1,755E-11	60	6,181E-12	600	1,394E-12	2,8	4,3
4	15	1,617E-11	60	5,705E-12	600	1,203E-12	2,8	4,7
5	15	2,409E-11	60	9,202E-12	600	1,705E-12	2,6	5,4

Příloha 3: Vypočítané koeficienty mocninné funkce proudu

Tab. 30 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota při teplotě 23 ± 2 °C

SYNPO hmota při teplotě 23 ± 2 °C					
Vzorek	1	2	3	4	5
$A [A.s^{-1}]$	3,00E-09	1,68E-09	3,10E-09	3,11E-09	2,76E-09
$n [-]$	8,30E-01	7,61E-01	8,51E-01	8,47E-01	8,09E-01

Tab. 31 Vypočítané koeficienty, CY238-1 hmota při teplotě -35 °C

CY238-1 hmota při teplotě -35 °C					
Vzorek	1	2	3	4	5
$A [A.s^{-1}]$	7,58E-10	6,52E-10	6,60E-10	6,19E-10	9,93E-10
$n [-]$	9,09E-01	8,85E-01	9,00E-01	8,82E-01	8,44E-01

Tab. 32 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota při teplotě -35 °C

SYNPO hmota při teplotě -35 °C					
Vzorek	1	2	3	4	5
$A [A.s^{-1}]$	1,03E-09	9,75E-10	1,32E-09	2,70E-09	1,43E-09
$n [-]$	9,33E-01	9,40E-01	9,84E-01	1,06E+00	8,50E-01

Tab. 33 Vypočítané koeficienty, CY238-1 hmota – vzorky v původním stavu

CY238-1 hmota – vzorky v původním stavu					
Vzorek	1	2	3	4	5
$A [A.s^{-1}]$	4,84E-09	7,65E-09	3,58E-09	3,84E-09	4,84E-09
$n [-]$	9,65E-01	8,57E-01	8,07E-01	8,88E-01	8,80E-01

Tab. 34 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota – vzorky v původním stavu

SYNPO hmota – vzorky v původním stavu					
Vzorek	1	2	3	4	5
$A [A.s^{-1}]$	7,61E-09	7,14E-09	5,21E-09	5,70E-09	3,89E-09
$n [-]$	7,15E-01	7,61E-01	9,29E-01	8,19E-01	6,81E-01

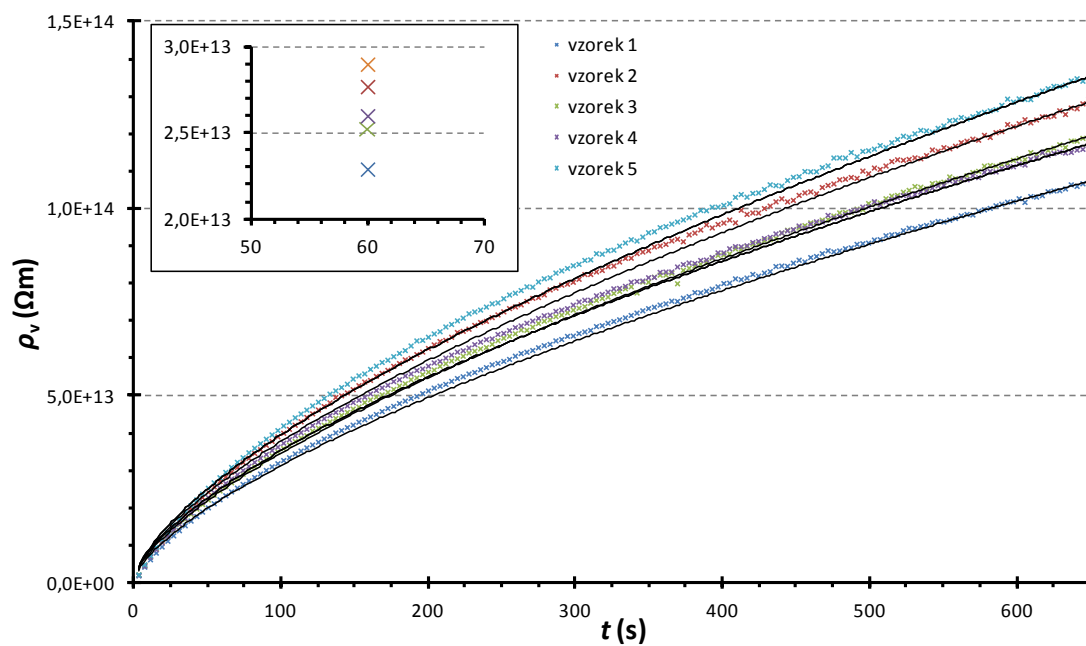
Tab. 35 Vypočítané koeficienty, CY238-1 hmota – teplotně stabilizované vzorky

CY238-1 hmota – teplotně stabilizované vzorky					
Vzorek	1	2	3	4	5
$A [A.s^{-1}]$	8,72E-10	7,15E-10	6,52E-10	6,65E-10	1,08E-09
$n [-]$	7,27E-01	7,05E-01	6,82E-01	7,09E-01	7,18E-01

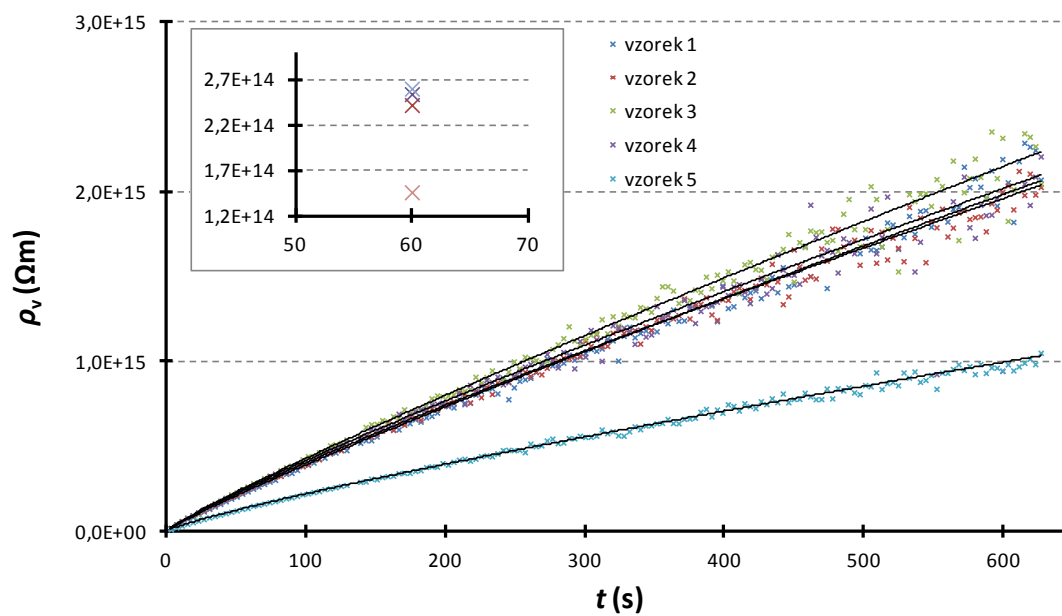
Tab. 36 Vypočítané koeficienty, SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky

SYNPO hmota – teplotně stabilizované vzorky					
Vzorek	1	2	3	4	5
$A [A.s^{-1}]$	9,62E-10	5,35E-10	9,65E-10	1,07E-09	7,85E-10
$n [-]$	5,73E-01	6,26E-01	7,10E-01	6,93E-01	6,42E-01

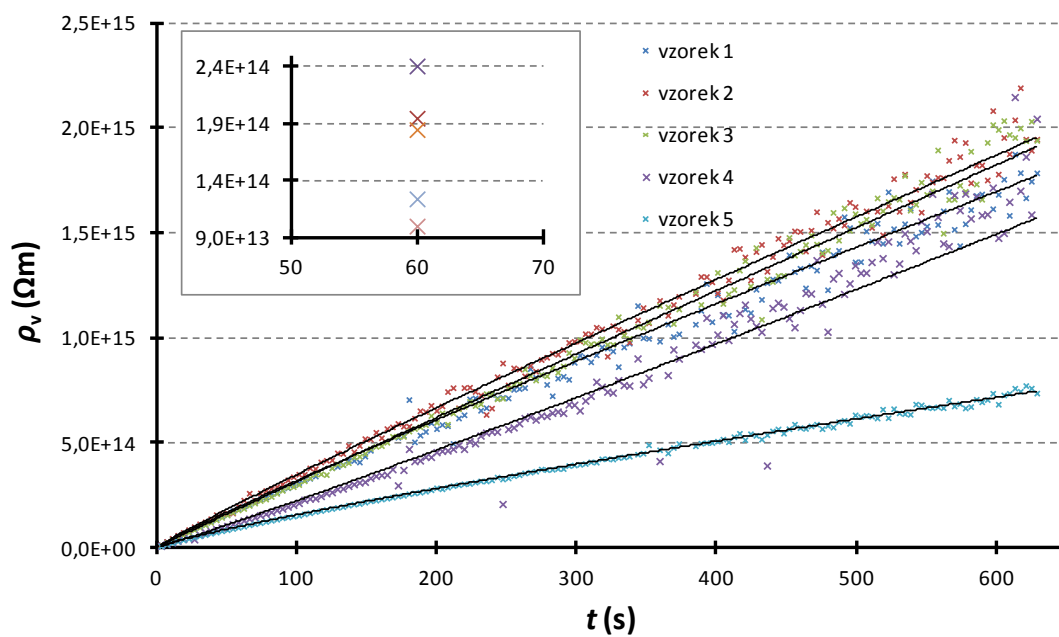
Příloha 4: Grafické závislosti vnitřních rezistivit



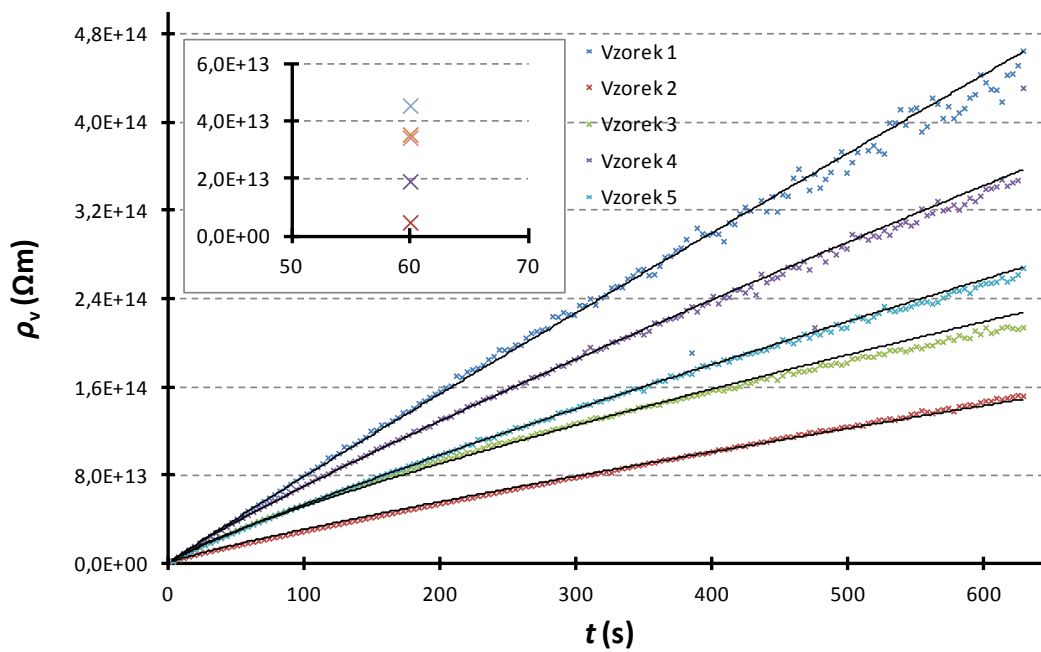
Obr. 40 Závislost vnitřní rezistivity na čase, CY 238-1, 23 °C



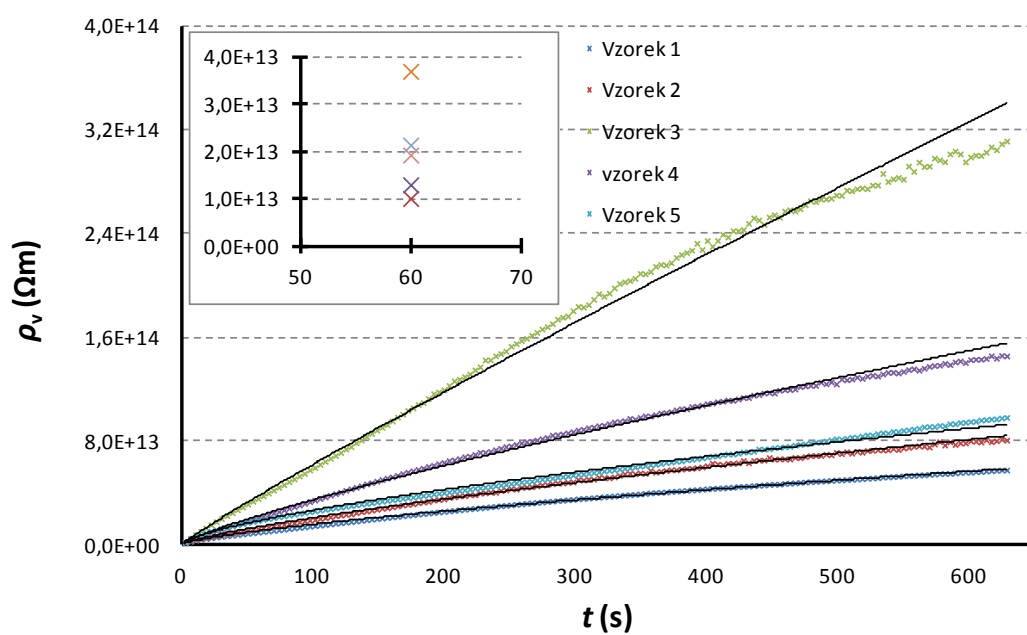
Obr. 41 Závislost vnitřní rezistivity na čase, CY 238-1, -35 °C



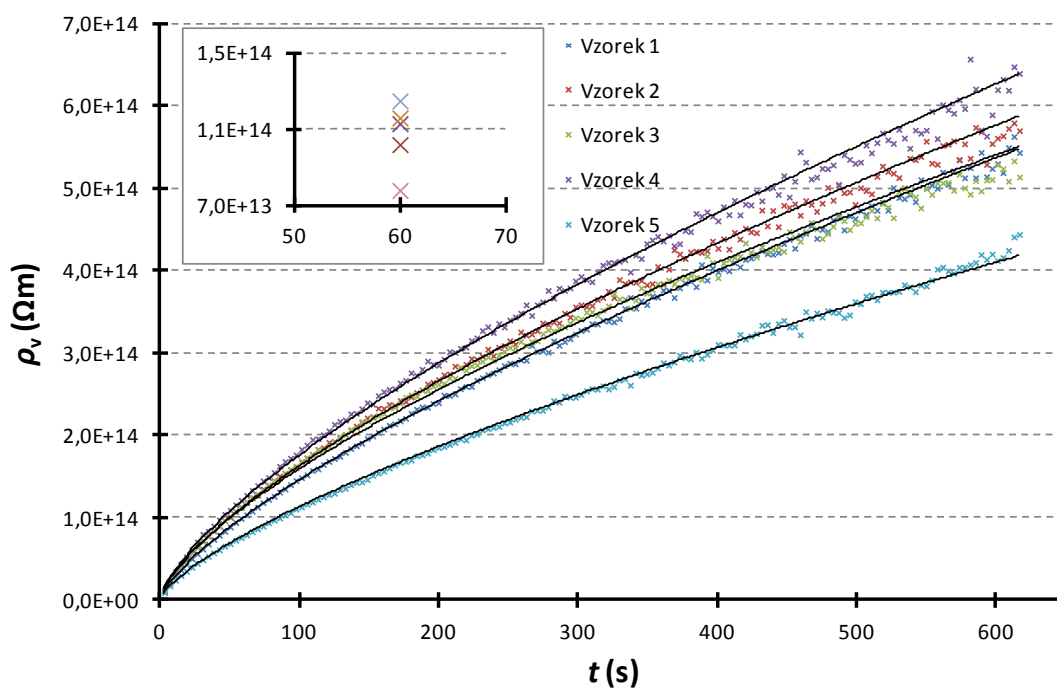
Obr. 42 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO, -35 °C



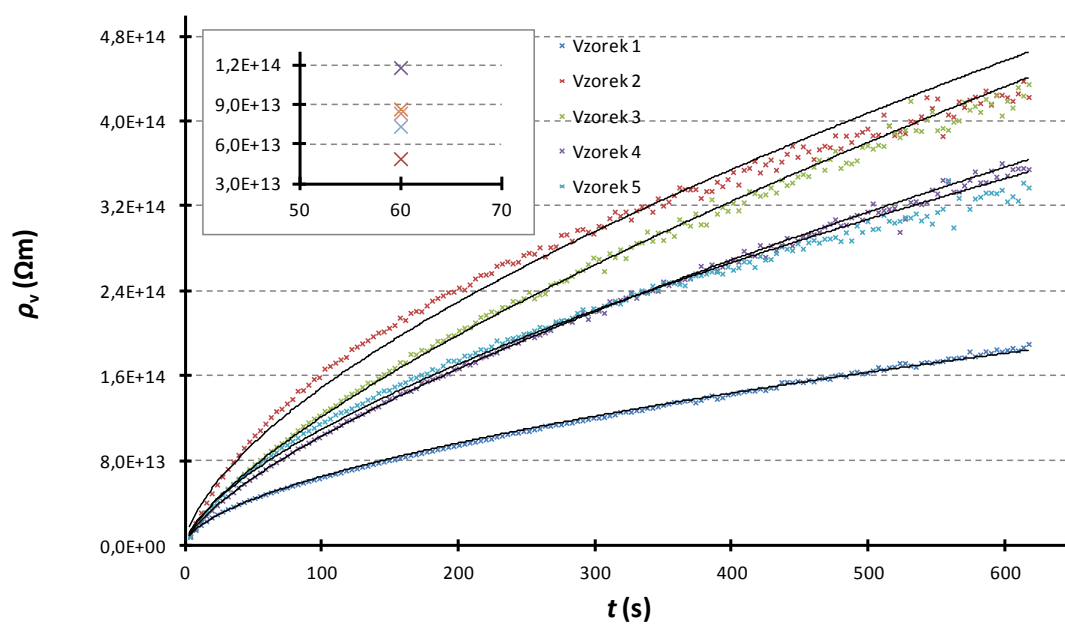
Obr. 43 Závislost vnitřní rezistivity na čase, vzorky v původním stavu, CY238-1



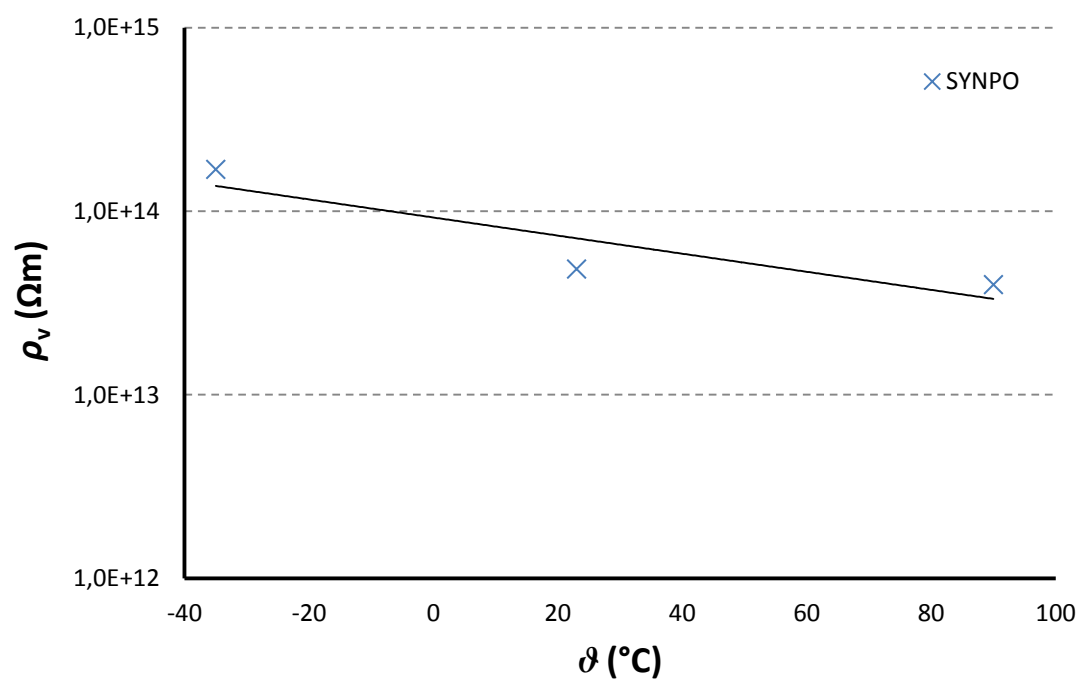
Obr. 44 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO hmota - vzorky v původním stavu



Obr. 45 Závislost vnitřní rezistivity na čase, CY 238-1- teplotně stabilizované vzorky



Obr. 46 Závislost vnitřní rezistivity na čase, SYNPO hmota - teplotně stabilizované vzorky



Obr. 47 Závislost vnitřní rezistivity na teplotě, SYNPO hmota